

Cálculo de fallas en sistemas de potencia

Ing. Rafael Guerrero C.

Prólogo Ing. Jesús Flores Valle

Un cordial saludo a todos los lectores de este libro.
Me presento: soy el Ingeniero Gabriel Angulo Pérez. Escribo esta breve nota para compartir la historia detrás de la imagen que aparece en la portada. La fotografía fue tomada por el Ingeniero Rafael Guerrero C. y captura el momento exacto en que un rayo impacta una torre de transmisión. Según la información que me fue compartida, la imagen corresponde a una subestación ubicada en la salida de la Ciudad de México hacia Toluca, en el anillo de 400 kV.

Esta interesante anécdota me fue relatada por el Ingeniero Gerardo López Villatoro, quien en su momento fue alumno del Ingeniero Rafael.

....

Preservar y digitalizar libros técnicos como este es de gran importancia para el conocimiento y la memoria histórica del sector eléctrico. Si bien muchos textos pierden vigencia con el tiempo, este en particular aborda un tema que continúa siendo actual y fundamental en la operación y análisis de los sistemas eléctricos de potencia. Escanearlo no solo permite conservar su contenido, sino también garantizar su accesibilidad a las nuevas generaciones de profesionales, fortaleciendo así la formación técnica y la toma de decisiones informadas en un sector clave para el desarrollo del país.

....

Las paginas faltantes del libro son solo hojas en blanco

julio de 2025

Para J.C.S.

Nov/80.

Cálculo de fallas en sistemas de potencia

Ing. Rafael Guerrero C.

Cálculo de fallas en sistemas de potencia

Ing. Rafael Guerrero C.

Prólogo Ing. Jesús Flores Valle

EDICIONES DEL SECTOR ELECTRICO

PROLOGO

CONSCIENTES DE LA *gran responsabilidad que Comisión Federal de Electricidad tiene comprometida con el pueblo de México en la importante función de operar de manera económica y confiable el sistema eléctrico nacional, proporcionando un servicio público de energía eléctrica de la más alta calidad y convencidos de nuestra responsabilidad compartida en este objetivo, el Centro Editorial de la Dirección General de CFE, con los mejores deseos de proporcionarle al personal técnico los elementos de información actualizada para su desarrollo profesional, ha hecho la impresión de esta obra titulada CALCULO DE FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA, preparada por el señor Ing. Rafael Guerrero Cepeda, a quien de manera especial agradecemos su valiosa colaboración y alabamos su gran esfuerzo puesto en la preparación de la misma, reconociendo su ardua y productiva labor en el campo del análisis de las redes eléctricas y sus protecciones, así como su gran dedicación e interés por la enseñanza, pues justo es decir, que este trabajo es fruto de su experiencia y de la aplicación de sus conocimientos en la solución de los problemas reales del sistema eléctrico nacional.*

Desde la aparición de la computadora digital como una herramienta sumamente eficaz y el principio de la era de los sistemas como un nuevo método sintético de pensamiento en la década de los cuarenta, la planeación, el análisis y la operación de los sistemas eléctricos de potencia han tenido una serie de cambios importantes en cuanto a su concepto y en cuanto a las

metodologías y tecnologías empleadas. Es por esto que en la actualidad los profesionales de ingeniería que laboran en estas áreas, deben manejar y dominar no sólo los aspectos conceptuales, sino tener los conocimientos y dominio necesarios sobre las herramientas y metodologías más adecuadas para el análisis óptimo de los sistemas eléctricos y también sobre el desarrollo constante de los mismos con el fin de afrontarlos de manera más eficiente en el futuro.

Existe una gran cantidad de información técnica sobre esta temática, que permite conocer las investigaciones más recientes, desde la elaboración de algoritmos hasta los conceptos más actualizados sobre la utilización de la computadora y la teoría de los sistemas en el control en tiempo real, de los sistemas eléctricos y toda la problemática que su operación económica y confiable involucra.

Varios libros tratan en formas muy variadas y diversas los temas que nos ocupan, algunos por su calidad se consideran como excelentes referencias para el análisis de fallas en sistemas eléctricos. En esta obra se han tomado como referencias las publicaciones anotadas en el capítulo 2, con el fin de sustentarla de manera cualitativa y cuantitativa en su contenido, y además se ha considerado indispensable darle un enfoque más práctico y realista, tanto en el planteamiento como en la solución de los problemas acorde a las necesidades específicas de los ingenieros de Comisión Federal de Electricidad y de las necesidades de la empresa misma, basadas fundamentalmente en la sucesiva experimentación de sucesos y problemas reales en nuestras propias instalaciones. Esto hace posible presentar los temas de una manera clara, realista y comprensible.

En el capítulo 1 se dan explicaciones sobre la terminología y los conceptos utilizados en el texto, con el fin de lograr una cultura homogénea, así como una breve descripción general del contenido del mismo.

En el capítulo 2 titulado "Referencias" se enumeran las obras de los autores más serios en esta materia, consultadas y tomadas como base científica para complementar de manera efi-

ciente el objetivo fundamental de este trabajo.

El objetivo del capítulo 3 titulado "Conceptos Generales" es el de proporcionar una explicación y reafirmación de los conceptos y teoremas, técnicos y metodológicos para el análisis de fallas en sistemas de potencia, como lo es la útil y necesaria representación del diagrama unifilar con los elementos pasivos y activos de un sistema eléctrico.

El capítulo 4 titulado "Circuitos Equivalentes de Transformadores" explica la teoría y aplicación de las componentes simétricas, herramienta matemática muy útil para el análisis de circuitos equivalentes, tratando la teoría fundamental de la manera más sencilla y accesible.

En el capítulo 5 se trata el tema "Comportamiento de la Máquina Síncrona Durante Fallas", teniendo en cuenta que los sistemas de potencia operan a frecuencia constante, y que la capacidad de generación se obtiene con máquinas síncronas. Esto hace necesario explicar de manera sencilla y clara la temática respectiva; como en la velocidad de sincronismo, reactancia síncrona, reactancia de secuencia negativa, reactancias transitorias y subtransitoria, así como también el análisis de diagramas vectoriales.

En el capítulo 6 se ejemplifican las soluciones por el método manual de tres problemas reales de cálculo de corto circuito del Sistema Tampico.

El objetivo del capítulo 7 titulado "Asimetría de la Corriente de Falla" es el de explicar de manera sencilla los conceptos técnicos de máxima y mínima asimetría de una corriente de falla, así como el concepto práctico y su aplicación.

En el apéndice "A" del capítulo 8 se trata el tema "Análisis Progresivo de los Equivalente de Secuencia Cero", teniendo como objetivo presentar y explicar de una manera sencilla y práctica la forma de graduar en forma descendente el uso de los circuitos equivalentes de transformadores, cuando éstos están bajo la acción de la componente simétrica que no tiene secuencia (secuencia cero). Así como también la solución de 7 problemas prácticos y reales con el fin de lograr una mejor com-

prensión y aplicación de los fundamentos teóricos.

En el apéndice "B" se explica el concepto "Transitorio" en un circuito RL desde el punto de vista teórico y su aplicación a casos concretos.

En el apéndice "C", se proporciona una explicación de los métodos para seleccionar los bancos de tierra y la finalidad principal de su aplicación con el fin de reducir las sobretensiones ocurridas durante las fallas.

En el apéndice "D" se ejemplifica la solución del problema de polarización de relés de tierra cuando la fuente de secuencia cero es un autotransformador.

El objetivo que se persigue en el capítulo 9 es explicar el análisis por el método de mallas para el cálculo de corrientes de falla, haciendo énfasis en la utilización de la ley de Kirchhoff para voltajes, mostrando claramente cada una de las etapas de este método, como son la construcción de la matriz de conexión, obtención de la Z Loop, así como el artificio para la medición de la impedancia de Thevenin.

Es de suma importancia hacer resaltar que en el apéndice "E" del mismo capítulo se explica con claridad la aplicación del instructivo y listados de los programas para computadora denominados Hawk 01, Hawk 02, Hawk 03 y Hawk 04, diseñados para el cálculo de fallas por el método de Z Loop en problemas específicos del sistema eléctrico nacional.

En el capítulo 10, se trata el tema "Análisis por el Método de Nodos para el Cálculo de Corrientes de Falla", haciendo énfasis en la aplicación de las leyes de Kirchhoff para corrientes. Así como la explicación y uso del algoritmo para la formación de la matriz Z Bus.

En el apéndice "F" se explican en forma clara la aplicación de los instructivos y listados de los programas para computadora denominados Trifa y Monofa diseñados para el cálculo de cortos circuitos trifásicos y monofásicos.

En el apéndice "G" del capítulo 11 se tiene como objetivo el de presentar una comparación de los dos métodos matriciales empleados en el cálculo de fallas, así como proporcionar

una serie de conclusiones consideradas más relevantes.

En los apéndices "H-I", se tratan el método de simplificación de Z Loop, y los métodos matriciales de cálculo de fallas aplicados en un sistema de dos nodos.

El capítulo 12 tiene como objetivo presentar y explicar los conceptos generales de las "Redes Equivalentes" y su empleo en componentes lineales y no lineales, así como un ejemplo numérico para lograr un dominio eficiente en su aplicación. Incluye también una explicación y ejemplos numéricos para la comprobación de estos procedimientos.

Esperamos y deseamos a todos los que consulten esta obra, que les proporcione eficaz ayuda para la obtención de los mejores resultados en la aplicación directa de la solución de sus problemas respectivos.

Promoveremos seguramente más elementos de información para que persista y se lleve adelante la continuidad institucional de capacitar, adiestrar y actualizar permanentemente a nuestro personal y a preocupados e interesados, a profesionales y estudiosos de las cuestiones de la industria eléctrica.

ING. JESUS FLORES VALLE

1.- INTRODUCCION

Como una consecuencia de la aplicación práctica que se da a los valores de falla, es usual aceptar al iniciar el cálculo, las siguientes simplificaciones:

1.- Todos los "shunts", como cargas, capacitancia de líneas, etc. se desprecian.

2.- Todos los transformadores se suponen en tap nominal.

3.- Todas las máquinas se representan por un voltaje constante - - atrás de su reactancia equivalente (x'd ó x"d).

4.- El flujo de corrientes en la red previo a la falla, es cero. - Lo anterior quiere decir que todos los voltajes de generación son iguales en magnitud (pu) y ángulo.

5.- Las líneas de transmisión se suponen balanceadas, excepto para secuencia cero, los acoplamientos mutuos son cero.

En la literatura no reciente era usual encontrar tabulaciones como la - que se indica a continuación de donde se podían obtener los "factores - de asimetría" por los que debían multiplicarse los valores simétricos - para obtener la capacidad interruptiva a especificar.

	TIEMPO DE APERTURA	FACTOR
APLICACION GENERAL	2 ciclos	1.4
	3 ciclos	1.2
	5 ciclos	1.1
	8 ciclos	1.0
APLICACION ESPECIAL (GENERADORES)	2 ciclos	1.5
	3 ciclos	1.3
	5 ciclos	1.20
	8 ciclos	1.1
ESFUERZOS MOMENTANEOS		1.60

Como puede observarse tales factores se hacían depender fundamentalmente de la rapidez de apertura y de la cercanía a las fuentes generadoras (Relación X/R grande).

La mayoría de los interruptores que se instalan en México en líneas de alta tensión son de manufactura europea, por lo que las recomendaciones de la CEI (Comisión Internacional Electrotécnica) adquieren interés especial.

Tales recomendaciones anexas, definen términos tales como:

"Rated short-circuit breaking current" como la corriente más grande - que el interruptor debe ser capaz de interrumpir bajo las condiciones previas establecidas en las recomendaciones. Dicha corriente está caracterizada por dos valores:

a) El valor RMS de la componente de alterna denominada "Rated -- short-circuit current"

b) El porcentaje de la componente de directa.

En la página 50 de las recomendaciones se establece la nomenclatura en la pág. 51 se define el porcentaje de CD en función del tiempo. Si -- las tablas señalaban para interruptores de 2 ciclos y aplicación general factores de 1.40, para tiempo de 33.33 m seg. el porciento de CD, según las curvas es de 48%, valores muy cercanos y siempre sujetos al juicio de la persona que prepara las especificaciones.

En la mayoría de los casos los interruptores abren en 3 ciclos o más, es sensato aceptar que en ese instante las constantes que limitan o definen el valor de las contribuciones de las máquinas son las reactancias transitorias (x'd), sin embargo, es procedimiento tradicional establecido emplear x"d para especificar capacidades interruptivas; los valores calculados con reactancias subtransitorias (x"d) se utilizan - también para especificar "esfuerzos momentáneos"; sin embargo, deberá aceptarse que todo el procedimiento queda sujeto a juicio y que debe - contarse con valores calculados con x'd y x"d para fundamentarlo.

Deben puntualizarse dos hechos:

1) Los interruptores que conectan circuitos radiales, son los -- únicos que manejan toda la potencia de corto circuito: en el resto de los interruptores la capacidad es siempre menor.

2) Los estudios de fallas suponen disponibilidad 100% de máquinas, lo cual es un criterio pesimista.

Respecto a los procedimientos de cálculo descritos en este volumen, -- proceden de la aplicación de la teoría de componentes simétricas del - algoritmo para formar Z_{loop} y del algoritmo para formar Z_{bus} y dan -- como resultado: el valor RMS de la componente de alterna denominada - "Rated short-circuit current"

Dos procedimientos se describen:

1) Cálculo a mano para sistemas pequeños.

El cálculo a mano tiene sus limitaciones; su aplicación procede si se acepta que: la obtención de los valores de falla - puede complicarse tanto como se quiera, siempre en detrimento de la rapidez para obtener resultados. En ocasiones se emprenden discusiones sobre si un transformador trifásico repre

sentado en un circuito monofásico adelanta o atrasa 90° la -- corriente o el voltaje, sabiendo de antemano que tal defasa-- miento puede ser sólo de 30° ó 0° dependiendo de la conexión. Cuando el estudio se orienta para "estimar" capacidades in- - terruptivas da lo mismo que el valor final sea 300 ó 320 ó -- 280, de todos modos el interruptor que se va a adquirir es de 500 MVA.; en ocasiones el concepto de "bus infinito" es suficiente para sacar conclusiones. Si el cálculo es para coordinación de relés, la mayoría de los fabricantes acotan las curvas de operación a 20 veces el tap; que el valor de corriente sea 2180, 2240 amperes o algún otro valor cercano, carece de importancia. Los parámetros de líneas se calculan tomando la separación entre conductores más repetida; los parámetros del hilo de guarda varían con la magnitud de corriente, las longitudes de las líneas son generalmente aproximadas, el valor de la resistividad ρ es un promedio, etc.

Por otra parte, para una línea de transmisión de 115 KV y 75 Km:

$$Z = 5.588 + j\,32.2554 \text{ ohms}$$

$$= 32.73 \,\underline{/80}.17 \text{ ohms}$$

Llevar a cabo cálculos con la parte compleja de Z dará resultados aceptables, pues con respecto a la magnitud compleja la variación aparece en las décimas y es de 1.45%.

El procedimiento de cálculo a mano, trata con los conceptos - necesarios, presenta un método que organiza la información y ofrece a "golpe de vista" resultados, evitando repetición en los cálculos, usando la parte compleja de la impedancia (reactancias) y de la admitancia (susceptancias).

2) La 2a. y 3a. partes hacen un análisis matricial del problema, son métodos abundantes en artificios y que deben aplicarse -- cuando el procedimiento "a mano" ofrece dificultades. Evidentemente si el cálculo es por computadora trabajar con valores complejos resulta conveniente. Existen los inevitables Apéndices donde aparecen los listados de los programas para computadora que corresponden a los métodos descritos en las partes 2 y 3 y algunos temas de interés aplicables en redes eléctricas.

Finalmente, si bien es obvio, debe recalcarse que la intención - de estas notas es buscar soluciones prácticas, es ésta la razón por la que se acepta como resultado único del cálculo de fallas, a las corrientes que son las que emplean para seleccionar capacidades interruptivas y para coordinar protecciones. Los voltajes,

cantidades fáciles de calcular mediante conceptos similares, no se tratan en los apuntes. Todo el contenido, por último, pretende a partir de soluciones particulares, generalizar los procedimientos, los conceptos generales se incluyen en los programas para el cálculo digital de fallas.

El crédito del método de cálculo manual de fallas corresponde al Ing. Sergio Guerrero Alcázar (8). Y el crédito de la elaboración de los programas para el cálculo de fallas por el método de Z_{bus} (TRIFA y MONOFA) es para el Ing. Alfredo Chi Azamar.

R. GUERRERO C.
DEPTO. DE ANALISIS DE
REDES ELECTRICAS. CFE

2.- REFERENCIAS

(1) Stagg G. W. y El-Abiad: "Computer Methods in Power System Analysis" Mc-Graw -Hill Book - Company.

(2) Byerly R.T., Long R.W., Beldwin C. J., y King C. W.: "Digital Calculation of Power System Networks Under Faulted Conditions". AIEEE -- Transactions Febrero 1959; pág. 1296-1307.

(3) Brown H.E., Person C.E., Kirchmayer L.K. y - Stagg G.W. "Digital Calculation of 3-Phase - Short Circuits by Matrix Method". AIEE Transactions, Febrero 1961; pág. 1277-1282.

(4) Byerly R.T., Long R.W., y King C.W.; "Logic - for Applying Topological Methods to Electric Networks" AIEE Transactions, Noviembre 1958,- pág. 657-667.

(5) El-Abiad A. H.; "Digital Calculation of Line to Ground Short Circuits by Matrix Method" -- AIEE Transactions, Junio 1960, pág. 323-332.

(6) Brown H.E. y Person C.E.: "Short Circuit Studies of Large Systems". Power Systems Computations Conference, Stockholm, Junio 27 - Julio 1 de 1966.

(7) Freris L. L., Sasson A.M. "Investigation of - the Load-Flow Problem. Proc. IEE, Vol. 115,- No. 10, Octubre 1968, pág. 1459-1470.

(8) Guerrero Sergio A., Guerrero Rafael C.;"Estudios de Fallas en Sistemas pequeños." Publicación CFE 1963.

(9) Guillemin Ernst A.;"Introductory Circuit Theory." Wiley Edición 1953.

(10) Purdue Energy Research and Education Center; "A - - Network Representation and Reduction Study. User's Manual." Purdue University Lafayette. Indiana.

Cálculo de fallas en sistemas de potencia

3.- CONCEPTOS GENERALES

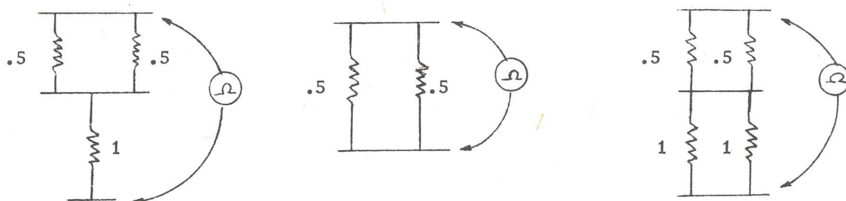
El sistema eléctrico representado en el diagrama unifilar está formado por elementos pasivos y elementos activos. En realidad el sistema así representado es un sistema trifásico o sea que la transmisión de energía de los centros de generación a los centros de carga se hace utilizando un sistema de tres fases y neutro modo convencional de transmitir energía; lo anterior, sin embargo, no impide su representación monofásicamente. Los elementos llamados pasivos como transformadores, - líneas de transmisión, reactores, etc. son sumamente fáciles de representar. Los elementos activos como generadores, condensadores síncronos, motores de inducción, motores síncronos, requieren del comentario de una serie de conceptos para entender plenamente su representación.

Pretendemos por principio de cuentas obtener las magnitudes de las --- corrientes y voltajes cuando un nodo de la malla se conecta en corto - circuito al nodo de referencia. El procedimiento de siempre para calcular dichas corrientes y voltajes es la aplicación de los teoremas de Thevenin y Norton.

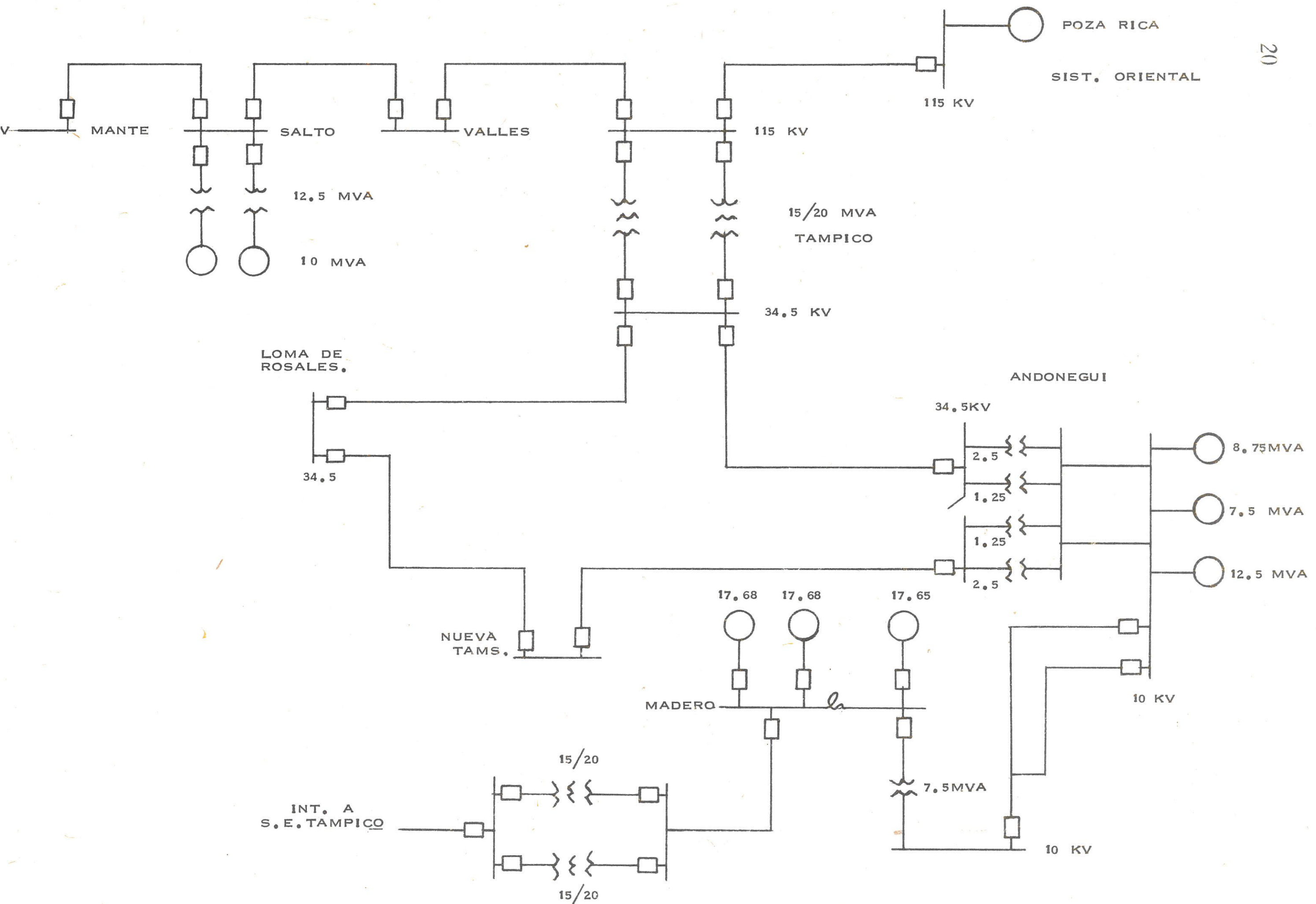
El teorema de Thevenin dice textualmente "Para un par de terminales, - una red activa lineal se puede substituir por una fuente generadora de voltaje y una impedancia en serie con dicha fuente" Para medir la impedancia de Thevenin en dos puntos de la malla, uno de ellos el de referencia, deberán ponerse en corto circuito todas las fuentes generadoras de tensión, pero deben retenerse las impedancias internas, el voltaje de Thevenin es el voltaje que se mediría en esas mismas dos terminales con la red en condiciones normales.

Se puede afirmar que el teorema de Norton es complementario del ante-- rior y textualmente dice: "Para un par de terminales, una red activa lineal se puede substituir por una fuente generadora de corriente y -- una impedancia en paralelo" Dicha impedancia se mide exactamente - -- igual que como se hizo en el primer teorema y la corriente de Norton - sería la que circularía si nosotros uniéramos sólidamente los puntos - A y B en el equivalente de Thevenin.

Lo anterior se explica de la siguiente manera: para nosotros no representa ninguna dificultad entender que en las cuatro siguientes figuras mediríamos sucesivamente 1.25, 0.25 y 0.75 ohms

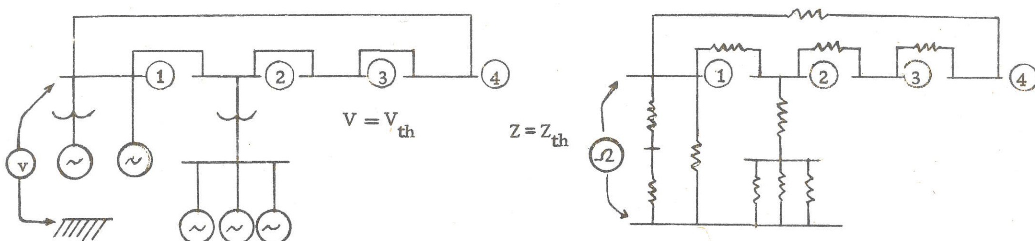


Asociando el procedimiento con el diagrama unifilar mencionado en primer término, cada uno de los elementos pasivos quedarán substituídos - por sus impedancias correspondientes, todas las fuentes generadoras --

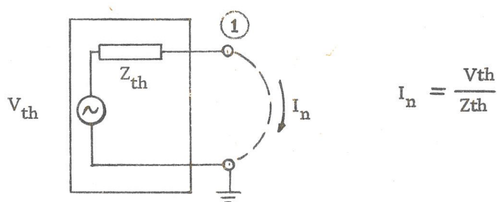


SISTEMA TAMPICO SIMPLIFICADO.

de tensión desaparecen y en su lugar se colocan las impedancias propias o internas

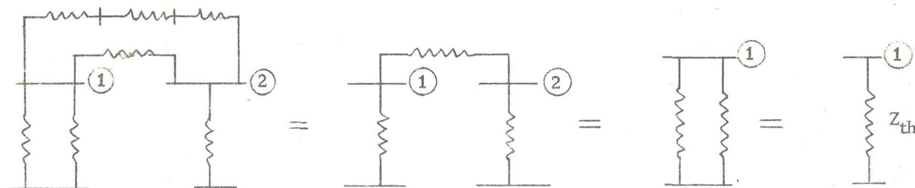


Abundando en lo anterior, si nos interesara conocer el comportamiento de la red para un corto circuito en el nodo 1, mediríamos la impedancia de Thevenin entre dicho nodo y la referencia. Para conocer el voltaje de Thevenin, con un vólmetro mediríamos la tensión entre los puntos 1 y referencia. Llevadas a cabo estas dos mediciones, podemos dibujar el circuito equivalente de Thevenin y aplicando el teorema de Norton, conocer la corriente total de corto circuito.



$$I_n = \frac{Vth}{Zth}$$

Ante la imposibilidad de medir directamente la impedancia de Thevenin (nadie se atrevería a medir con un ohmetro la impedancia entre el bus de 400 KV de la Subestación Puebla 2 y tierra) se dibuja en el papel una red equivalente y mediante aritmética simple, transformación serie-paralelo y delta-estrella, dicho valor puede ser calculado.



Selección de Bases.

La información disponible respecto a los parámetros de la red equivalente viene dada en dimensiones distintas, puede ser en ohms, en porciento o en por-unidad, inclusive los voltajes nominales de operación son diferentes. Es entonces evidente la necesidad de hacer homogénea la información disponible. Si decidimos que todos los valores se manejen en --

porciento, debe considerarse que el producto de dos cantidades deberá dividirse entre 100 y la división de dos cantidades deberá multiplicarse por 100; si la decisión del análisis es en ohms, deberá arrastrarse a lo largo del procedimiento un multiplicador igual a la relación de vueltas al cuadrado $(V_1/V_2)^2$. El método en por-unidad ofrece definitivamente más ventajas no sólo porque los datos de placa de generadores y transformadores pueden ser usados casi directamente, sino porque la información para estudios de flujos de potencia y estabilidad se hace en la totalidad de los casos manejando cantidades en por-unidad.

Consideramos por lo anterior, como único método conveniente el que maneje cantidades en por-unidad.

Como datos o como resultados del problema tendremos potencias, voltajes, corrientes e impedancias, por lo anterior, necesitamos bases o referencias de potencias, voltajes, corrientes e impedancias. Usualmente sólo una de estas cantidades se escoge con entera libertad, la potencia base; el resto de las bases o referencias es obligada. Puede afirmarse que el voltaje base es cantidad sujeta a selección lo cual es falso, ya que en el momento de plantear el problema o dibujar la malla equivalente los voltajes base ya están escogidos y son los nominales de operación.

Mediante el siguiente desarrollo se puede concluir que la afirmación anterior es válida y se puede concluir también que las mismas relaciones son válidas si se usan cantidades monofásicas o trifásicas.

Circuito Monofásico: Se escoge: KVA_{base}
Se conoce: KV_{base}

$$I_{base} = \frac{KVA_{base}}{KV\ base}$$

$$Z_{base} = \frac{KV_{base} \times 10^3}{I_{base}} = \frac{(KV_{base})^2 \times 10^3}{KVA_{base}} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

Circuitos Trifásicos: Se escoge: KVA_{base}
Se conoce: KV_{base}

Se obtiene: 1) $I_{base} = \dfrac{KVA_{base}}{\sqrt{3}\ KV_{base}}$ $\qquad KVA = \sqrt{3}\ KV \times I$

Un individuo de 1.75 m. de estatura representa 1°/1 es la referencia el individuo de 1.80 m. es comparado con la referencia 1.0285% y otro de 1.90 será 1.085%.

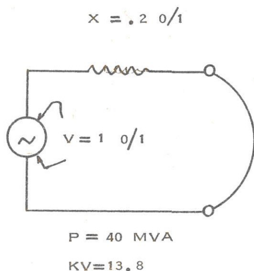
2) $$Z_{base} = \frac{\left(\frac{KV_{base}}{\sqrt{3}}\right) x10^3}{I_{base}} = \frac{\left(\frac{KV_{base}}{\sqrt{3}}\right) x10^3}{\frac{KVA_{base}}{\sqrt{3} \times KV_{base}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{KV_{base}}{\sqrt{3}}\right) \sqrt{3}\, KV_{base} \quad x10^3}{KVA_{base}}$$

$$= \frac{(KV_{base})^2}{\frac{KVA_{base}}{10^3}} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

En realidad, como afirmación final, se dice que existe una potencia base única, tantos voltajes base como voltajes de generación, transmisión y distribución tenga la red; lo anterior nos lleva como consecuencia, a aceptar tantas impedancias y corrientes base como voltajes base tenga la red; de esta manera se toman en cuenta las relaciones de transformación.

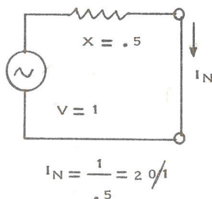
A la potencia base se le asigna cualquier valor, generalmente la potencia más veces repetida o una fácil para las operaciones, y como se demuestra en el cálculo sencillo que se lleva a cabo enseguida, si bien los valores de I_n en por unidad son distintos, los resultados finales en amperes siempre son iguales (I = 8377.31 amps.)



$P_{BASE} = 100$

$KV_{BASE} = 13.8$

$I_{BASE} = 4188.66$



$I_N = \frac{1}{.5} = 2$ o/1

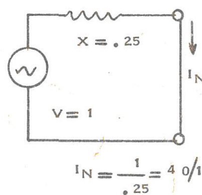
$I_{CC} = 2 \times 4188.66$

$= 8377.31$ AMPS

$P_{BASE} = 50$

$KV_{BASE} = 13.8$

$I_{BASE} = 2094.33$



$I_N = \frac{1}{.25} = 4$ o/1

$I_{CC} = 4 \times 2094.33$

$= 8377.31$ AMPS

4.- CIRCUITOS EQUIVALENTES DE TRANSFORMADORES

Componentes Simétricas.

El circuito equivalente de un transformador trifásico, dependiendo de sus conexiones, es diferente cuando se intercala en una red de secuencia positiva o cuando se intercala en una red de secuencia cero. Es por lo tanto oportuno, recordar los fundamentos respecto a la teoría de las componentes simétricas.

La parte fundamental de teoría es sumamente sencilla y como tal, deberá entenderse sin pretender buscarle complicaciones.

La separación de un vector en componentes para simplificar procedimientos de cálculo es de uso común, así un voltaje o corriente de alterna formado por dos componentes en cuadratura, se expresa como:

$$\bar{v} = v_1 + j\, v_2$$

El número de componentes pudiera ser, evidente, mayor que dos. Así:

$$E = IZ = (I_1 + I_2)Z \quad \text{es válido si:}$$

$$I_1 + I_2 = I$$

$$E = IZ = (I_1 + I_2 + I_3)Z \quad \text{se cumple si:}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

En las relaciones anotadas arriba podríamos decir en primer lugar que I_1 e I_2 son "componentes" de la corriente I, y también que I_1, I_2 e I_3 son "componentes" de la corriente I.

Con un criterio similar se establece que:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

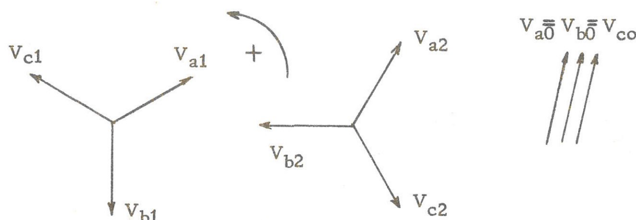
o sea, en un sistema trifásico desbalanceado el vector voltaje de cada fase será igual a la suma de tres componentes llamados de secuencia - positiva, negativa y cero.

Las componentes de secuencia positiva, acompañadas con índice 1, son - tres vectores de igual magnitud y separación angular de 120° entre ellas con secuencia normal ABC.

Las componentes de secuencia negativa, acompañadas con índice 2, son -- tres vectores de igual magnitud y separación angular de 120°, con secuencia ACB.

Las componentes de secuencia cero, acompañadas con índice 0 serán tres vectores de la misma magnitud y de la misma dirección.

Podemos considerar que las componentes simétricas de determinado sistema trifásico desbalanceado son las que se anotan enseguida:



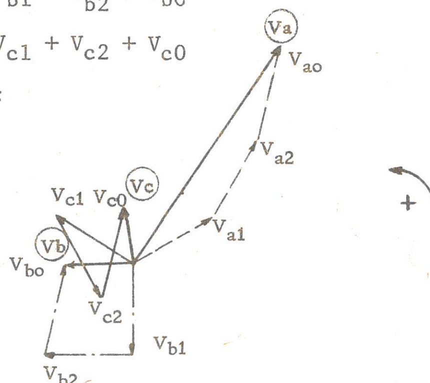
El sistema trifásico desbalanceado es fácil de graficar, si aplicamos las relaciones:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

y será el que se anota enseguida:



OPERADOR a

El operador "a" es un vector de magnitud unitaria y dirección 120°, - puesto en forma cartesiana será:

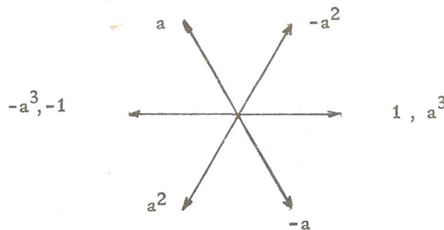
$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

De la misma manera el operador a^2 será un vector de magnitud unitaria y dirección 240°ó 120° que puesto en forma cartesiana será:

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Y finalmente el operador a^3 será un vector de magnitud unitaria y ángulo cero grados.

Aplicando el operador "a" a un vector particular, este vector no -- cambiará su magnitud solamente su dirección que será "adelantada" de acuerdo con el ángulo asociado con el operador "a".



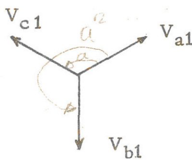
La propiedad de uso más general en el desarrollo de relaciones entre componentes simétricas será la anotada enseguida:

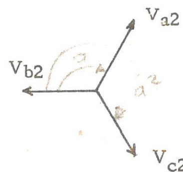
$$a = -\frac{1}{2} + j\,\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\,\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a + a^2 = -1 \implies \underline{a^2 + a + 1 = 0}$$

El operador "a" aplicado a las componentes simétricas del sistema -- trifásico desbalanceado da las siguientes relaciones:





Vao=Vbo=Vco



$V_{b1} = a^2 V_{a1}$ $\quad$ $V_{b2} = a V_{a2}$ $\quad$ $V_{b0} = V_{a0}$

$V_{c1} = a V_{a1}$ $\quad$ $V_{c2} = a^2 V_{a2}$ $\quad$ $V_{c0} = V_{a0}$

Va0=Vb0=Vc0

Por lo que las relaciones:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

Se modifican y quedan: (En función de Va1, Va2 y Va0)
(+) (-) (0)

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$
$$V_b = V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2}$$
$$V_c = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}$$

Que expresado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Si denominamos:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

La inversa de A será:

$$A^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Puesto que se cumple que $A\,A^{-1} = I$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

entonces: $V\phi = A\,Vs$

$$A^{-1}V\phi = Vs$$

Que equivale a:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

o bien

$$3V_{a0} = Va + V_b + V_c$$

$$3V_{a1} = Va + aVb + a^2Vc$$

$$3V_{a2} = Va + a^2Vb + aVc$$

Estamos pues en posibilidad de:

a).- Calcular las cantidades de fase conocidas las componentes simétricas

b).- Calcular las componentes simétricas en función de las cantidades de fase.

Siempre y cuando se respeten estrictamente las reglas que limitan el uso de las componentes simétricas.

1).- Voltajes de secuencia positiva, negativa o cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente.

2).- Corrientes de determinada secuencia sólo podrán producir voltajes de esa misma secuencia.

3).- Los puntos 1 y 2 se resumen diciendo que: no existe interacción entre secuencias distintas.

4).- Los elementos activos de la red, sólo generarán voltaje de secuencia positiva. Lo anterior es obvio; para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa tendría que girar en sentido contrario. Sería así mismo imposible que Va, Vb, Vc fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, característica de las cantidades de secuencia cero.

5).- Los voltajes de secuencia negativa y cero se consideran generados en el punto de falla; disminuyen en magnitud tan pronto nos alejamos de ese punto.

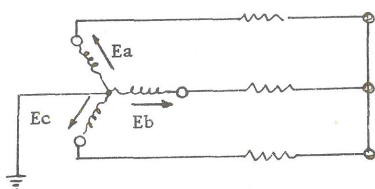
6).- El voltaje de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máximo en los puntos de generación.

7).- Como las corrientes de secuencia cero, están en fase y son del mismo tamaño, necesitan el neutro, 4o. conductor, conexión a tierra, para poder circular.

Para establecer la consistencia de este recurso y las interconexiones entre redes para distintos tipos de fallas, consideremos que la máquina de la figura está en vacío, pero excitada de tal modo que Ia, Ib, Ic = 0; en el instante t_0 se produce un corto circuito que podrá ser:

Interconexión de mallas para distintos tipos de falla.

Trifásico



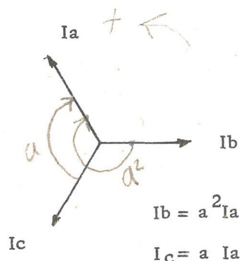
Tomando Ia como referencia

para secuencia positiva:

$$3Ia_1 = Ia + aIb + a^2Ic$$

como:
$$Ib = a^2Ia$$
$$Ic = aIa$$

$$3Ia_1 = 3Ia \quad ó \quad Ia_1 = Ia$$



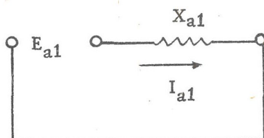
para secuencia negativa:

$$3Ia_2 = Ia + a^2Ib + aIc$$
$$= Ia + aIa + a^2Ia$$
$$= Ia\ (1 + a + a^2) = 0$$

para secuencia cero:

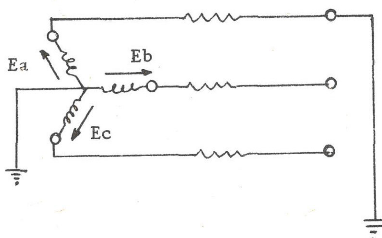
$$3Ia_0 = Ia + Ib + Ic$$
$$= 0$$

El resultado es consistente: en condiciones trifásicas balanceadas sólo existe secuencia positiva, y la red de secuencia (+) será:



$$Ia_1 = I_{cc} = \frac{Ea}{Xa_1}$$

De Fase a tierra:



Evidentemente

$$Va = 0$$
$$Ib = 0$$
$$Ic = 0$$

$$\text{como} \quad Ib = a^2Ia_1 + aIa_2 + Ia_0 = 0$$
$$\text{e:} \quad Ic = aIa_1 + a^2Ia_2 + Ia_0 = 0$$
$$(Ib-Ic) = (a^2-a)Ia_1 + (a-a^2)Ia_2 = 0$$

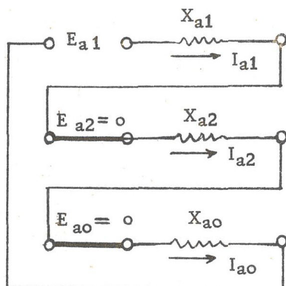
o bien $Ia_1 = Ia_2$

$$\text{como} \quad Ib = a^2Ia_1 - aIa_1 + (Ia_1 - Ia_1) + Ia_0 = 0$$
$$(a^2 + a + 1)Ia_1 - Ia_1 + Ia_0 = 0$$

de donde $Ia_1 = Ia_0$

o sea: $Ia_1 = Ia_2 = Ia_0$

Las redes dibujadas enseguida deberán conectarse en serie para cumplir con esta condición:



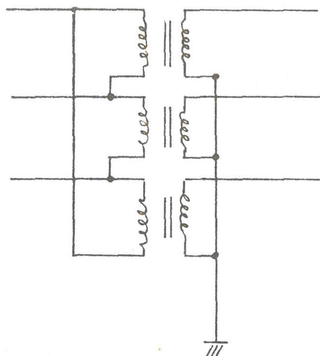
$$Ia_1 = Ia_2 = Ia_0 = \frac{Ea}{Xa_1 + Xa_2 + Xa_0}$$

Entre fases:

Por ser de poca aplicación, los resultados de un análisis de fallas de 2 Fases - tierra y entre fases, se excluye de estas notas.

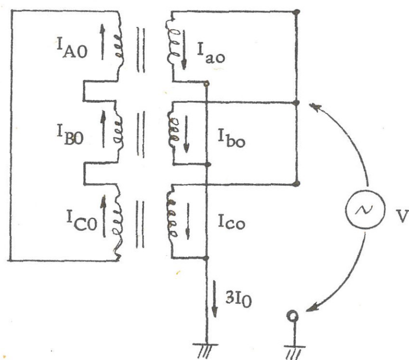
El circuito equivalente.

Respecto a los equivalentes para líneas, generadores y transformadores, el interesante al análisis para ser intercalado en la red de secuencia cero es este último. Vistas las conexiones, Delta o estrella de cada devanado, su comportamiento es radicalmente distinto y radicalmente cambia el aspecto de la red de secuencia cero. Así, deduzcamos el equivalente del transformador delta-estrella de la figura.

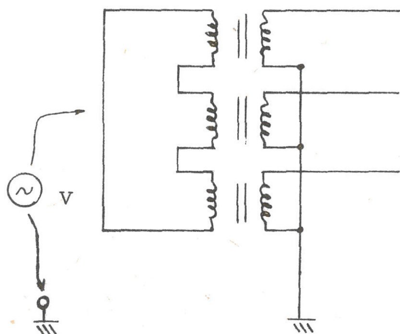


Se trata de hacer circular por él, corrientes de secuencia cero - (en fase e iguales en tamaño). De acuerdo con los párrafos (1), - (5) y (7) que restringen el uso de las componentes simétricas se - nos ocurre, poner en corto el devanado en estrella y alimentar con un voltaje monofásico aplicado entre el corto circuito y tierra -- (4° conductor) en estas condiciones, por el devanado en estrella fluyen tres corrientes iguales en ángulo y magnitud que se suman - en el neutro de tal modo que por él circula

$$3I_{a0} = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}$$

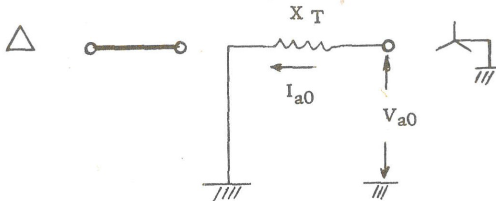


Cada corriente induce en la delta I_{A0}, I_{B0} e I_{C0} que por ser - iguales y en fase circularán en la delta. Si el procedimiento se repite para la delta:

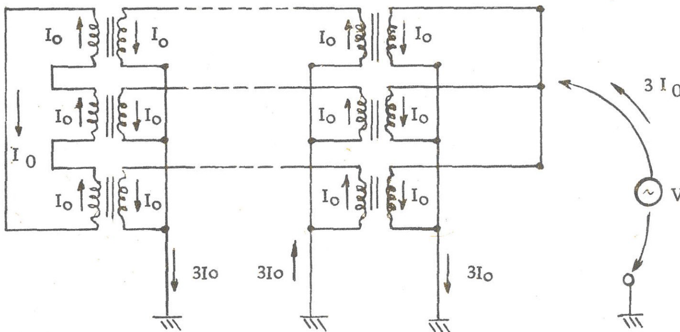


la corriente vale cero, lo que indica que $Z = \infty$ o sea el circuito para secuencia cero, está abierto.

El equivalente monofásico será

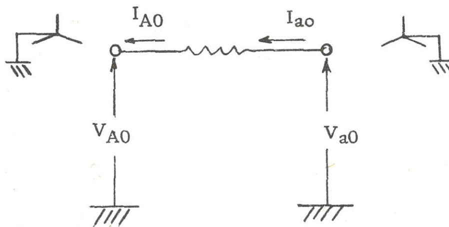


El otro equivalente interesante es el que corresponde al transformador ⅄ ⅄ con neutro aterrizado. La inyección de corriente ($3I_{a0}$) que se intenta en cualesquiera de los dos devanados, tendrá éxito sólo si el otro devanado termina a través de conexiones externas en otro transformador (ver figura)



Bastaría con abrir cualquier neutro para que el circuito se comportara como si Z = ∞

El equivalente monofásico sería el de la figura, y se dice que "deja pasar la secuencia cero"



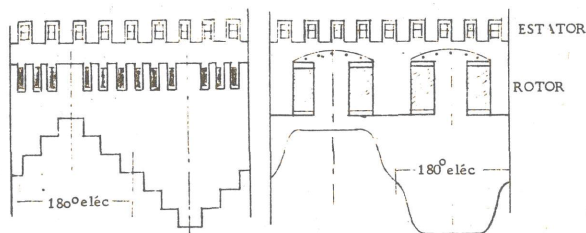
5.- COMPORTAMIENTO DE LA MAQUINA SINCRONA DURANTE FALLAS

Todos los sistemas de potencia operan a frecuencia constante, y la capacidad de generación se obtiene mediante máquinas síncronas. La relación que existe entre la velocidad de sincronismo Ns, la frecuencia f y el número de polos p del rotor es:

$$Ns \text{ rev/min} = 120 \cdot f/p$$

Ocasionalmente parte de la capacidad de generación se obtiene mediante generadores asíncronos y con bastante más frecuencia el exceso o falta de potencia reactiva se cubre con condensadores síncronos.

Los generadores son en su gran mayoría de dos tipos, dependiendo de la velocidad de la turbina. Con turbinas de vapor, son posibles altas velocidades 3600, 1800 revs/min para 60 ciclos con dos y cuatro polos respectivamente; debido a la gran velocidad periférica se requiere que el rotor sea cilíndrico o sea: fabricado de una sola pieza de acero forjado con ranuras longitudinales en donde se aloja el devanado de los polos.



Con turbinas hidráulicas la velocidad varía en un rango de 150 a 600 rpm, dependiendo del tipo de rueda móvil de la turbina y de la carga hidrostática; debido a que la velocidad periférica es pequeña, se requiere que el estator sea de gran diámetro con un número grande de polos. Estas máquinas tienen polos laminados sujetos al "spider" razón por la cual se designan como de "polos salientes"

En cualquiera de las dos la fem inducida por fase está dada por la relación:

$$E = 2k_1 \, k_2 \, k_3 \, \phi \, Z \, f$$

donde:
- ϕ es el flujo por polo
- Z es el número de conductores en serie por fase
- f es la frecuencia
- k_1 k_2 y k_3 combinados dan 1.05 aproximadamente para

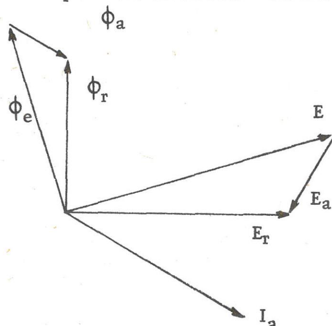
Y si bien, los flujos están bien lejos de una forma senoidal, el voltaje terminal si lo es, mediante el proceso de sumar los voltajes generados en los conductores individuales.

Desde el punto de vista eléctrico, existen dos diferencias entre las máquinas de polos lisos (rotor cilíndrico) y los de polos salientes; la primera: las variaciones cíclicas del rotor con respecto a la velocidad síncrona se amortiguan mediante la producción de corrientes parásitas en el rotor. La máquina de polos salientes (polos laminados) no es autosuficiente para amortiguar esas desviaciones, es por esto que generalmente se adiciona el "devanado amortiguador" que no es otra cosa que una jaula de ardilla ubicada en la superficie de los polos, donde las corrientes inducidas pueden circular. La segunda y más importante diferencia es que la reluctancia del entrehierro en la de rotor-liso es casi uniforme en toda la circunferencia del rotor; en la de polos salientes varía enormemente de un valor máximo entre polos (eje q) a un valor mínimo frente a la superficie del polo (eje d); es por esta razón que los dos tipos de máquinas tienen para el análisis de regulación diagrmas vectoriales distintos.

Reactancia Síncrona

Una máquina de rotor liso podrá ser representada mediante un circuito equivalente previa aceptación de los siguientes razonamientos:

El flujo en el entrehierro se considera como la suma vectorial de dos flujos, uno producido por el campo y otro por la reacción de armadura (la corriente del estator produce este último); estos flujos se pueden traducir también como fmm generadas y así:

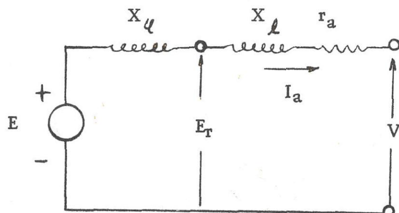


Er, voltaje en el entrehierro es la suma vectorial de E, voltaje de excitación y Ea generado por la reacción de armadura. Entonces:

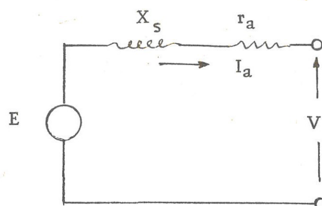
$$E - jI_a X_\varphi = E_r$$

X_φ es una constante de proporcionalidad relacionando Ea con Ia y se denomina como "reactancia magnetizante"

Er, el voltaje en el entrehierro difiere de voltaje terminal (V) sólo por la caída en la resistencia y la reactancia de dispersión de la armadura o sea:



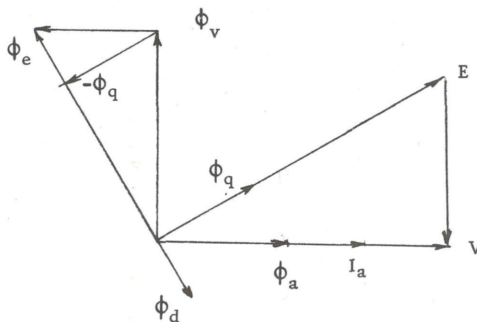
Si $X_s = X_\varphi + X_\ell$



NOTA: X_ℓ - involucra no sólo el flujo de dispersión sino también el flujo asociado con las armónicas creadas debido a que el flujo no es senoidal

X_s - se conoce como reactancia síncrona y en este caso (rotor liso) $Xd = Xs$

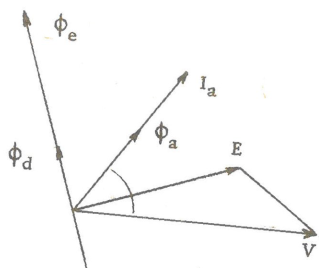
Para la máquina de polos salientes, los conceptos anteriores no son aplicables por las siguientes razones: el flujo ϕ_e (con la máquina en vacío produce la fem E) se modifica por el flujo ϕ_a (reacción de armadura) de tal modo que el flujo resultante ϕ_V genera el voltaje terminal V.

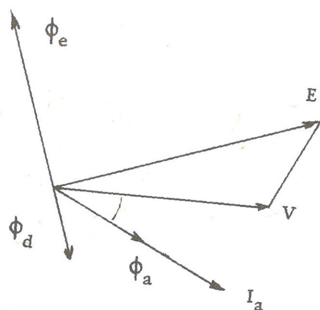


Este voltaje se obtiene si ϕ_a se resuelve en dos componentes, una en fase con E (eje en cuadratura q) y otra a 90°(eje directo d). ϕ_q causa un defasamiento de ϕ_V; ϕ_d refuerza o debilita a ϕ_e, dependiendo del factor de potencia. Evidentemente, la reluctancia en eje en cuadratura (trayectoria en aire) es mayor que la reluctancia en eje directo (trayectoria en hierro) y como cualitativamente

Flujo = fmm/Reluctancia
inductancia = flujo/corriente

$$X_d > X_q$$
$$X_d = X_\ell + X_{\varphi d}$$
$$X_q = X_\ell + X_{\varphi q}$$

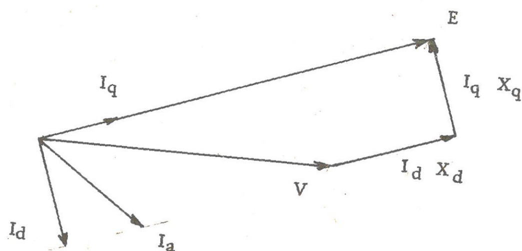




refuerza

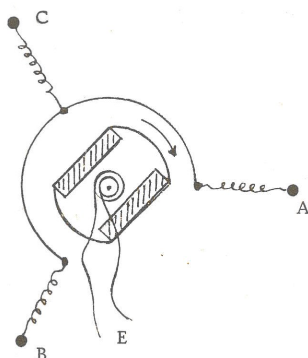
desmagnetiza

El diagrama vectorial para regulación será:



Reactancia de Secuencia Negativa

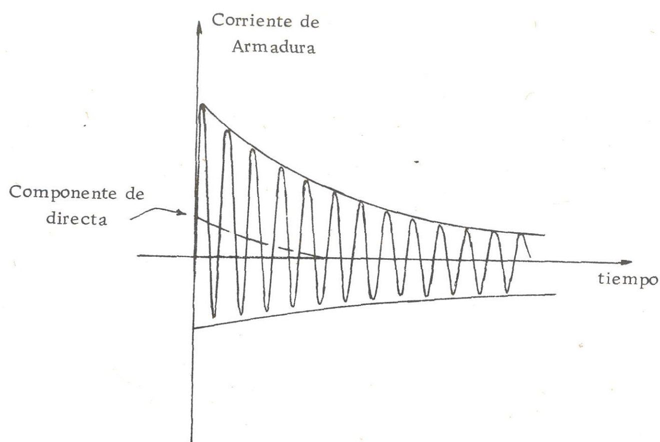
Cuando el rotor gira para generar el valor máximo de voltajes en orden abc se dice que la secuencia es abc. Aceptado que el rotor gira a velocidad síncrona, que el voltaje presente en las terminales abc gira a velocidad síncrona también, no habrá movimiento relativo entre el rotor y el campo producido por el estator y por lo tanto, no habrá fem inducida en campo ni corrientes parásitas en el hierro del rotor.

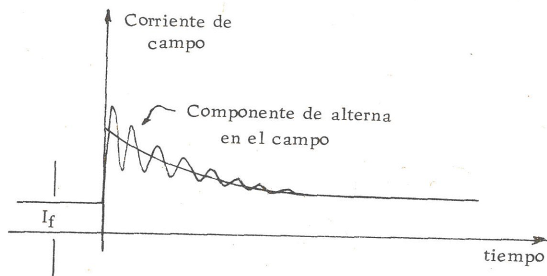


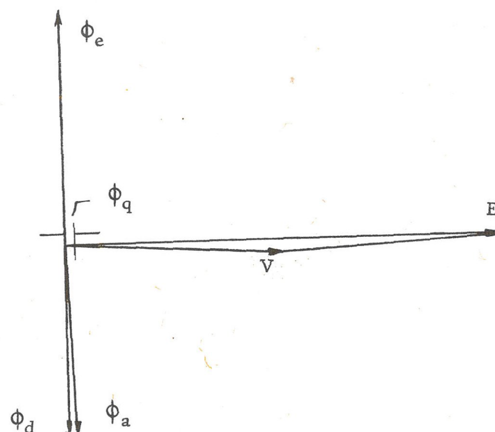
Si invertimos la secuencia del estator, existirá una frecuencia relativa entre el campo del estator y los conductores y metal del rotor de 120 ciclos; la máquina se comporta como un transformador con secundario en corto-circuito, operando a 120 ciclos cuya reactancia se llama de secuencia negativa; es generalmente más pequeña que X_d o X_q en las máquinas de polos lisos, es igual a $(X_q'' + X_d'')/2$ en la de polos salientes.

Reactancia transitoria y subtransitoria

Si suponemos que el oscilograma de la figura fue registrado cuando a una máquina en vacío y excitada para tener en sus terminales voltaje nominal, le aplicamos súbitamente un corto circuito trifásico en el instante t_0 y que los trazos pertenecen a la corriente de campo y a la corriente de armadura, notaremos que: la corriente de armadura crece y dado que el factor de potencia de ésta es atrasado y es muy pequeño, el efecto de la reacción de armadura es netamente desmagnetizante (razón por la que sólo se usan para el cálculo de fallas reactancias en eje directo).

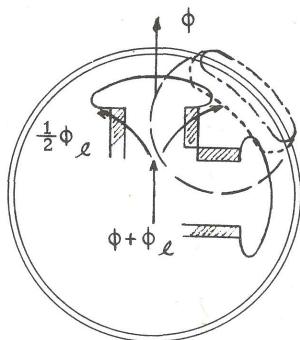

Corriente de
Armadura
Componente de
directa
tiempo


Corriente de
campo
Componente de alterna
en el campo
I_f
tiempo


ϕ_e
ϕ_q
E
V
ϕ_d
ϕ_a

Sin embargo, el flujo en los polos, debido a la inductancia grande del circuito del campo, no puede cambiar instantáneamente y como respuesta natural, se induce una corriente en el campo que se opone al cambio y que tendrá la misma dirección que la corriente If, antes de aplicar el corto circuito. Al final de cuentas, la reacción de armadura logra modificar el flujo principal, no sólo en el entrehierro sino también en el hierro, de tal modo que la corriente de armadura decrece exponencialmente hasta estabilizarse en un valor.

Las distintas trayectorias que emplea la reacción de armadura en varios instantes, se muestran en la siguiente figura y definen el comportamiento subtransitorio y transitorio



Trayectoria de flujos

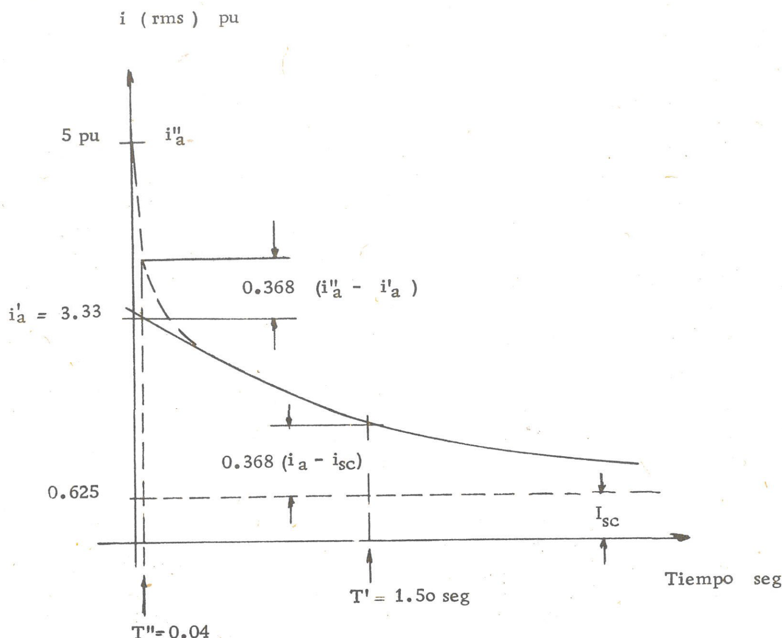
Subtransitorio —·—·—·
Transitorio - - - - - - - - -
Estado estable ——— ———

En resumen: durante el período subtransitorio, el flujo está confinado totalmente a una trayectoria en aire, debido a las corrientes inducidas en las caras del polo y devanados amortiguadores. Estas corrientes decaen rápidamente debido a la inductancia pequeña de sus trayectorias. La componente en eje ϕq es pequeña debido al bajo factor de potencia, por lo que la importancia de X_q es secundaria.

Durante el período transitorio el cambio rápido de ϕ_a en eje directo puede ocurrir, dado que la trayectoria incluye sólo aire y los extremos del polo. El valor estable del flujo se alcanza en poco tiempo y termina cuando ϕ_a modifica $\phi + \phi_\ell$

Observando la gráfica:

$$i_t = (\mathring{i}a'' - \mathring{i}a') e^{-t/T''} + (\mathring{i}a' - I_{sc}) e^{-t/T'} + I_{sc}$$



Por lo tanto, la representación de la máquina se lleva a cabo mediante el uso de X'd o X"d, dependiendo de la aplicación del estudio (capacidades interruptivas o coordinación de relés) y si a eso agregamos las simplificaciones siguientes, la dificultad del problema se reduce sensiblemente.

1) Todos los "shunts": cargas, efecto capacitivo se desprecian

2) Todos los transformadores se suponen en tap nominal

3) Todas las máquinas se representan por un voltaje constante atrás de su reactancia transitoria o subtransitoria

4) El flujo de corriente en la red previo a la falla, es cero; o sea, todos los voltajes de generación son iguales en magnitud y ángulo.

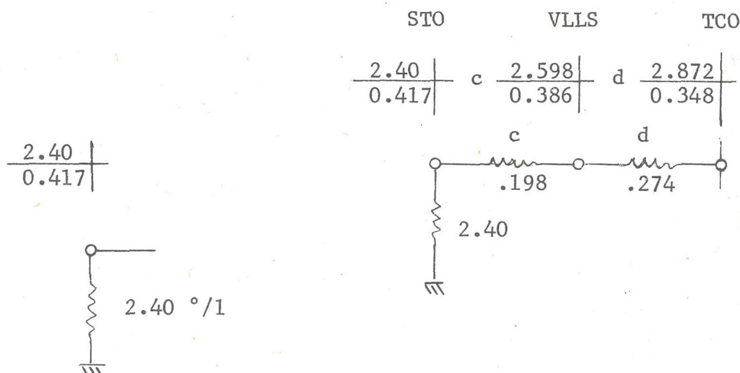
5) Las líneas de transmisión se suponen balanceadas, los acoplamientos mutuos son cero, excepto en secuencia cero.

6.- SOLUCION DE UN PROBLEMA REAL POR EL METODO MANUAL.

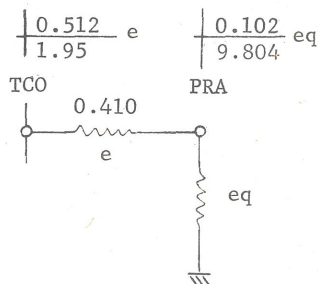
Partiendo de la información generalmente disponible, buscamos, tomando como base los conceptos anteriores, la solución para cortos circuitos del sistema mostrado en el diagrama unifilar. El procedimiento a seguir aprovecha al máximo la información útil y se basa en lo siguiente:

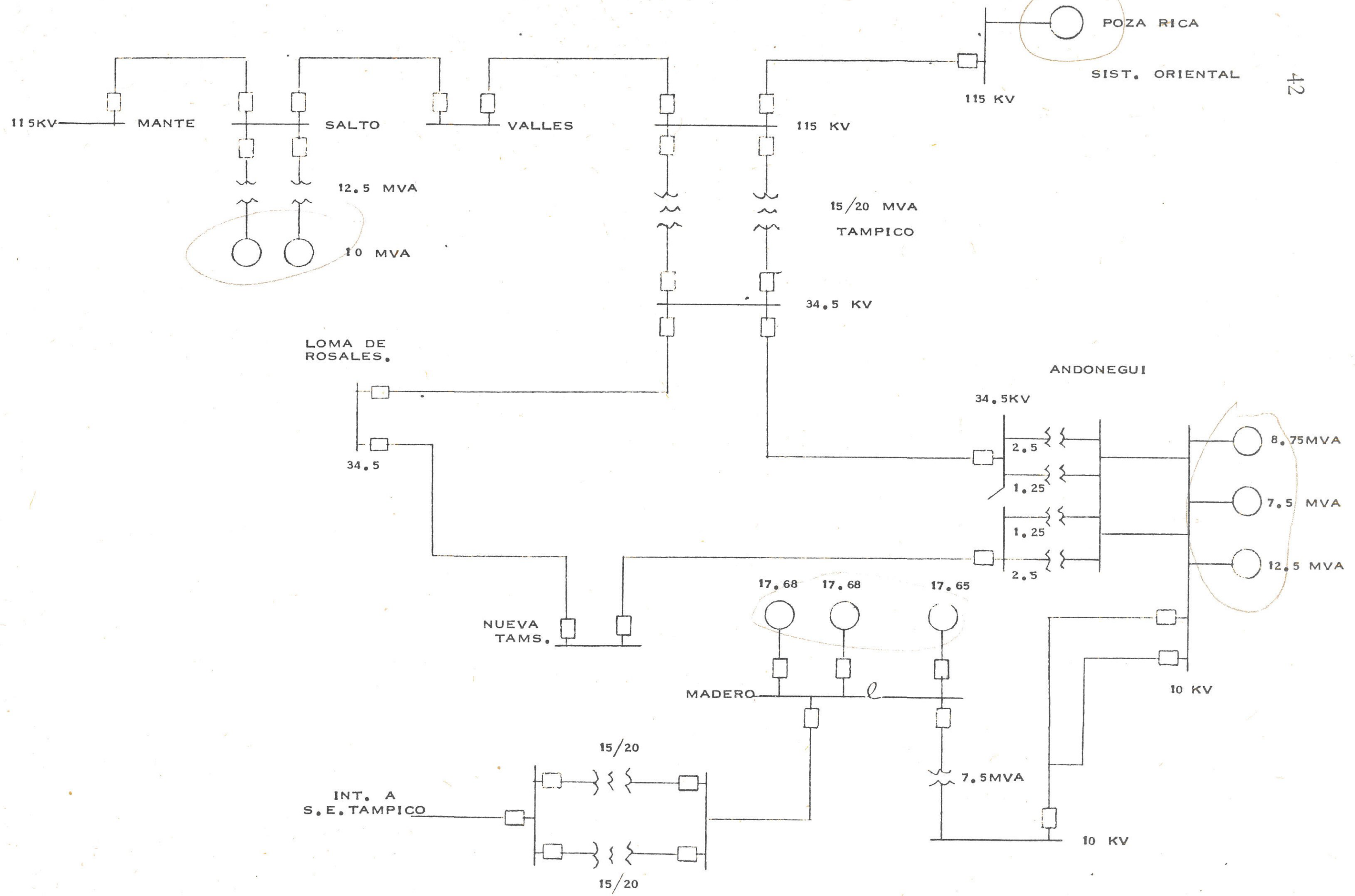
1) Todos los elementos de la red se identifican con una letra.

El análisis se empieza por un extremo y se contabilizan las sumas y las reducciones en paralelo, mediante un quebrado; en la parte superior se anota la reactancia y en la inferior la susceptancia, así:



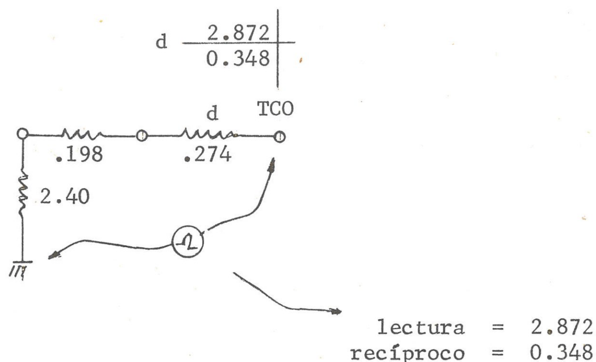
o también:



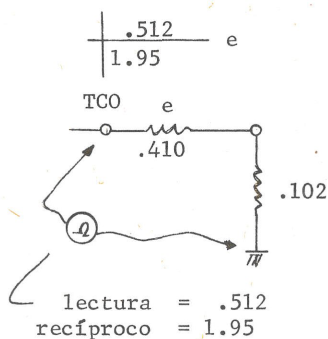


SISTEMA TAMPICO SIMPLIFICADO.

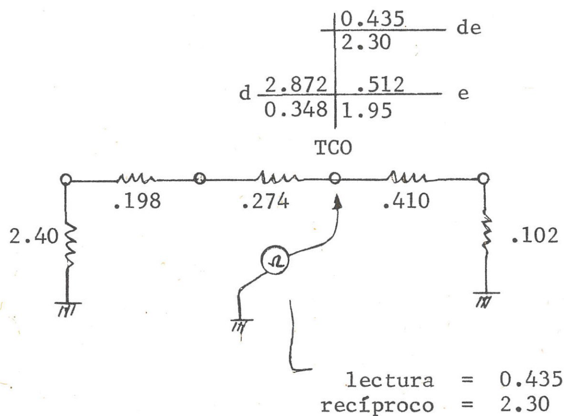
Lo anotado en las "antenas" indica por ejemplo: en Tampico (TCO) la reactancia equivalente hacia d es 2.872.



Hacia e la reactancia equivalente es:



La medición total de d y e en paralelo será:



En realidad de se calcula sumando las susceptancias parciales - - - (.348 + 1.95 = 2.30) que se anotan en el sitio adecuado; su recípro co dará la reactancia total X = 1/2.30 = 0.435

Evidentemente, cuando es necesario llevar a cabo transformaciones - - delta-estrella el método fracasa, por lo que su uso se limita a sistemas pequeños; para grandes redes se usan invariablemente procedimientos matriciales.

Aplicando este procedimiento racionalmente se forman las redes de secuencia positiva y cero (secuencia (-) igual a secuencia (+) generalmente) mismas que se muestran en las páginas siguientes.

El aprovechamiento de la información lograda se ejemplifica enseguida:

Problema Núm. 1

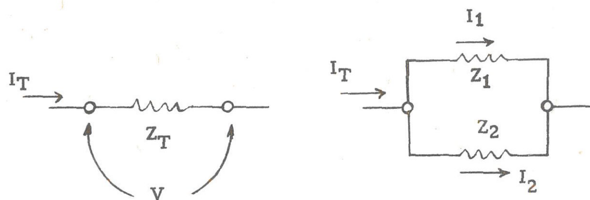
El valor de la falla trifásica en el bus de Valles (VLLS) será:

la impedancia (reactancia) de Thevenin = .4201

$$I_{cc} = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = \frac{1}{.4201} = 2.38\ °/1$$

2.38 es un valor que ya estaba anotado como .4201/2.38; lo anterior quiere decir que a simple vista se conocen los valores de falla en todos los nodos de la red.

Las aportaciones tradicionalmente se calculan considerando que:

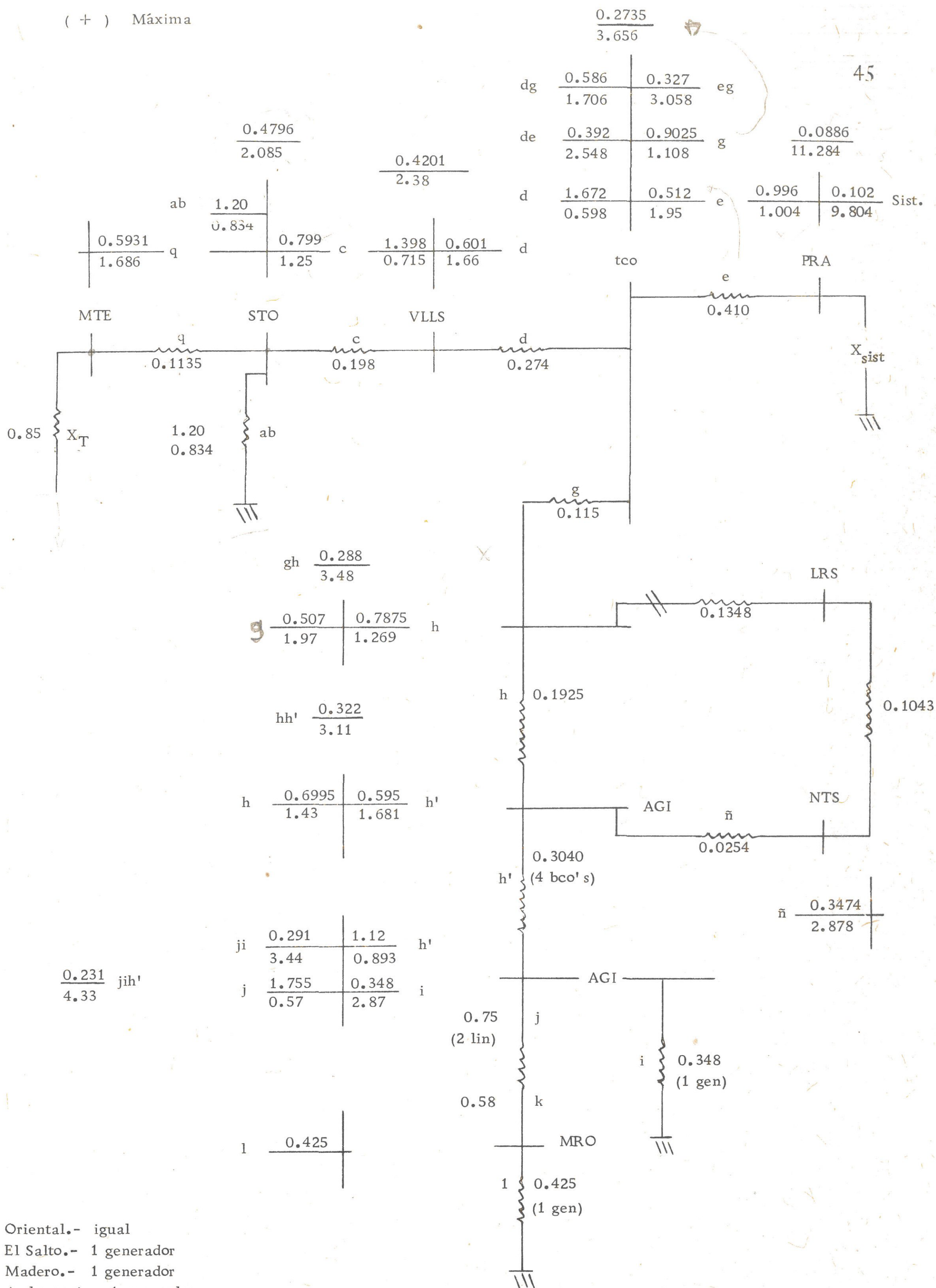


$$V = I_T Z_T = I_1 Z_1 = I_2 Z_2$$

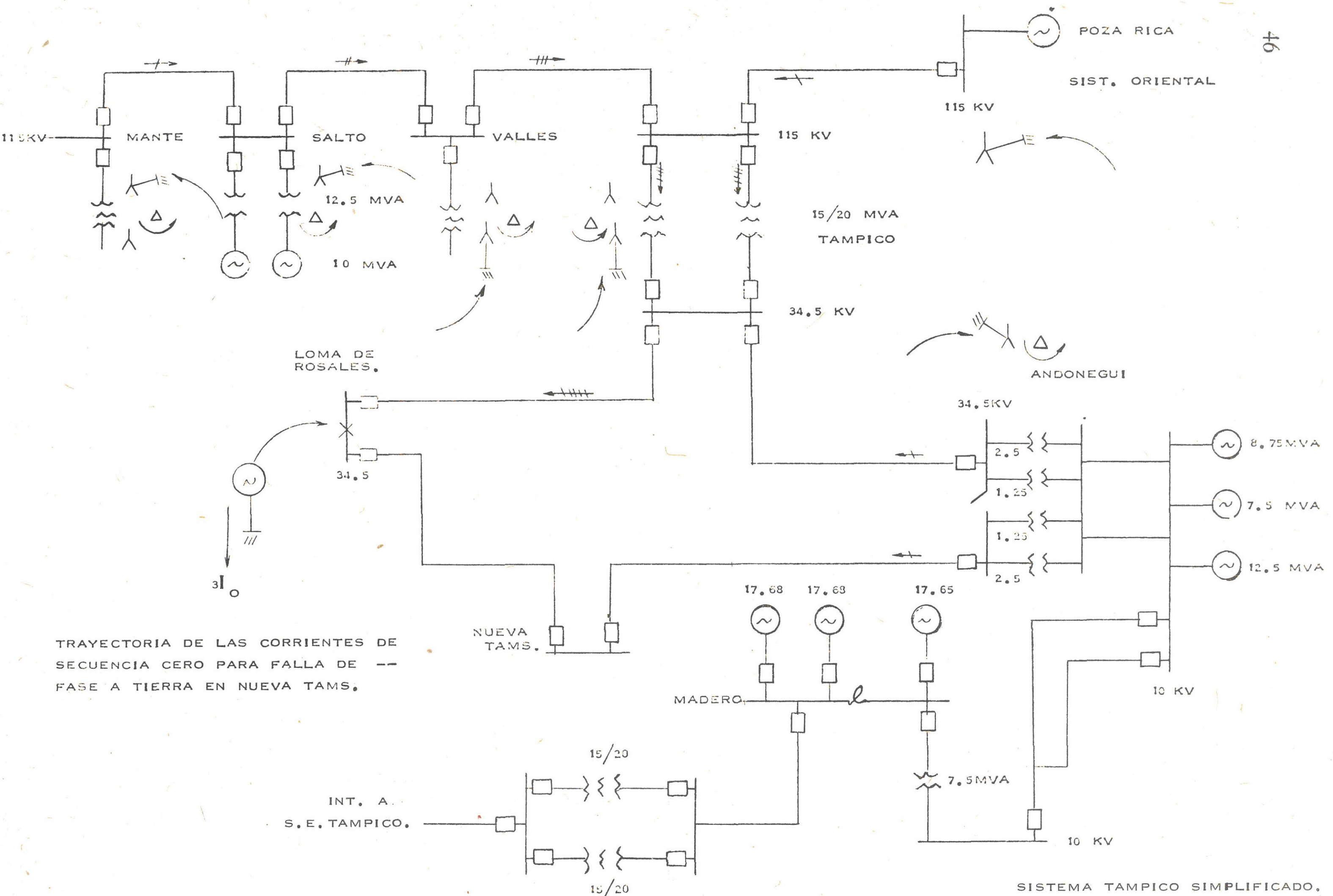
son conocidas I_T, Z_T, $Z1$ y Z_2 por lo tanto:

$$I_1 = \frac{I_T Z_T}{Z_1} = I_T \frac{Y1}{Y_T}$$

$$I_2 = \frac{I_T Z_T}{Z_2} = I_T \frac{Y2}{Y_T}$$



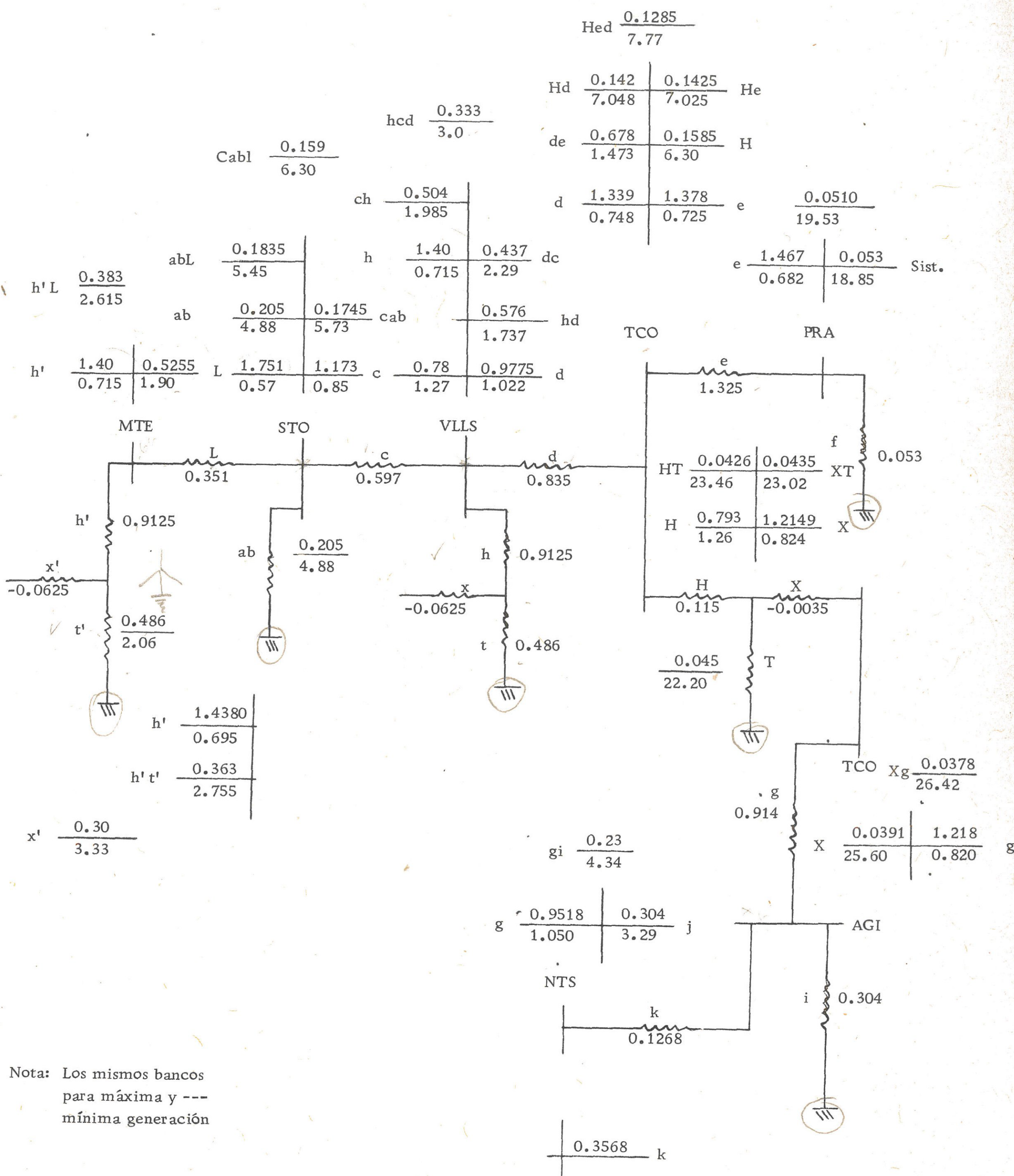
Oriental.- igual
El Salto.- 1 generador
Madero.- 1 generador
Andonegui.- 1 generador



TRAYECTORIA DE LAS CORRIENTES DE SECUENCIA CERO PARA FALLA DE -- FASE A TIERRA EN NUEVA TAMS.

SISTEMA TAMPICO SIMPLIFICADO.

(0) MAXIMA GEN.
(0) MINIMA GEN.



Nota: Los mismos bancos para máxima y --- mínima generación

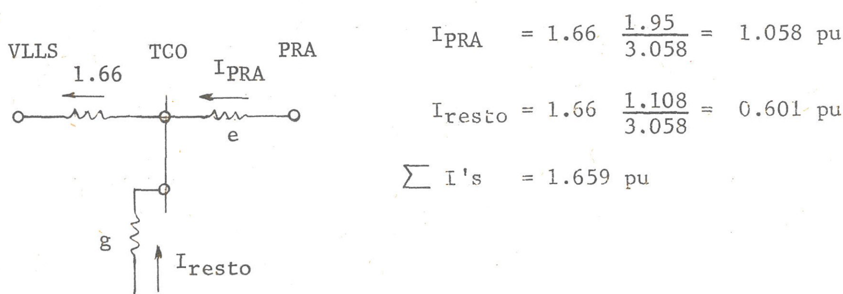
Para la falla total en Valles, es la suma de dos contribuciones, una procedente del Salto (STO) y la otra de Tampico (TCO)

$$I_{STO} = I_T \frac{Y_{STO}}{Y_T} = 2.38 \; \frac{0.715}{2.38} = 0.715 \quad pu$$

$$I_{TCO} = I_T \frac{Y_{TCO}}{Y_T} = 2.38 \; \frac{1.66}{2.38} = 1.66 \quad pu$$

Los dos valores 0.715 y 1.66 pueden leer directamente de la malla de secuencia positiva.

Si se desea saber qué porcentaje de la aportación de Tampico da Poza Rica (PRA) y qué tanto Andonegui, se procede de la siguiente manera:



$$I_{PRA} = 1.66 \; \frac{1.95}{3.058} = 1.058 \quad pu$$

$$I_{resto} = 1.66 \; \frac{1.108}{3.058} = 0.601 \quad pu$$

$$\sum I's = 1.659 \quad pu$$

eg	$\frac{.327}{3.058}$		
g	$\frac{.9025}{1.108}$	$\frac{0.512}{1.95}$	e

Problema Núm. 2

Determinar el valor de la falla de fase a tierra en el bus de Valles (VLLS)

Para fallas de fase a tierra la obtención, desafortunadamente, no es tan simple como cuando sólo se maneja secuencia (+), la complicación se observa enseguida:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

como generalmente $Z_1 = Z_2$ $\quad I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{2Z_1+Z_0}$

para Valles: $X_1 = .4201 \qquad X_0 = 0.333$

por lo tanto $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \dfrac{1}{1.1732} = .8524$ pu

Para el punto de falla

$$I_a = 3\,I_{a0} = 2.557$$
$$I_b = 0$$
$$I_c = 0$$

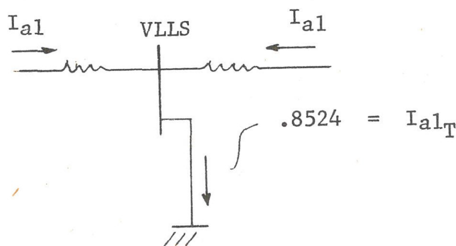
Se desea así mismo conocer qué porcentaje de la corriente total (I_a) da o aporta Poza Rica y qué tanto el resto. Así:

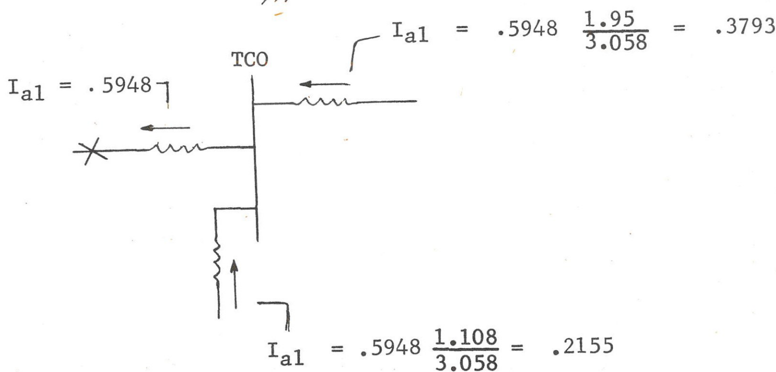
$$I_{a_{PRA}} = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

I_{a1} debe ser determinada a partir de la red de secuencia positiva; I_{a0} debe ser determinada a partir de la red de secuencia cero.

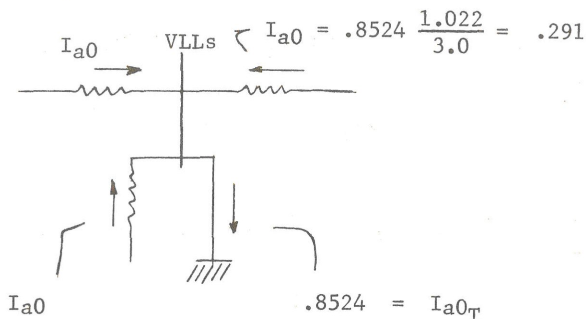
Para $I_{a1} = I_{a2}$

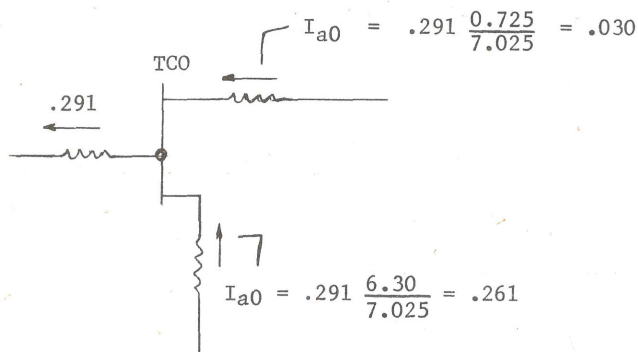
$.8524\,\dfrac{0.715}{2.38} =$ $\qquad\qquad .8524\,\dfrac{1.66}{2.38} = .5948$



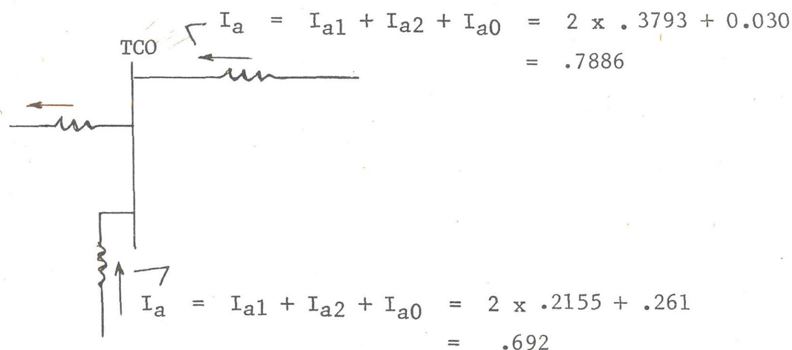


Para I_{a0}





Finalmente:

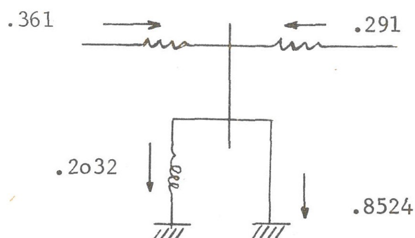


Cuando se trata de distribuir corrientes residuales, el problema se simplifica, ya que $3I_{a0} = I_a + I_b + I_c$ se distribuye usando solamente la red de secuencia cero.

Problema Núm. 3

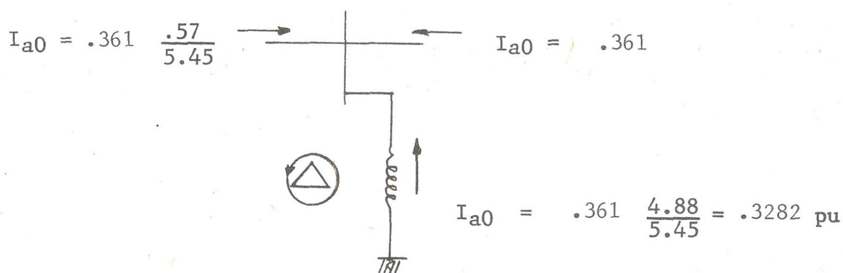
Qué valor de corriente residual se mide en el neutro del transformador del Salto (STO) para la falla en Valles?

VLLS

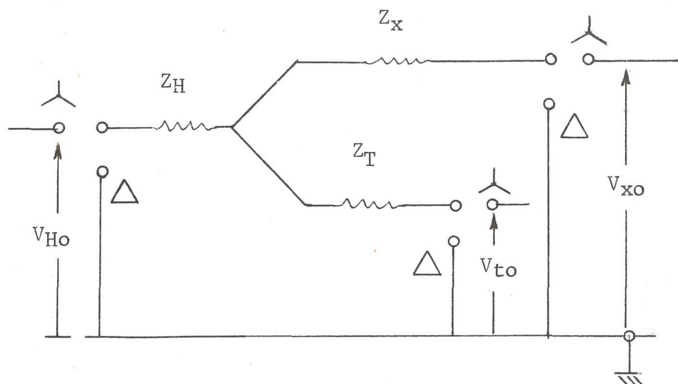


Finalmente:

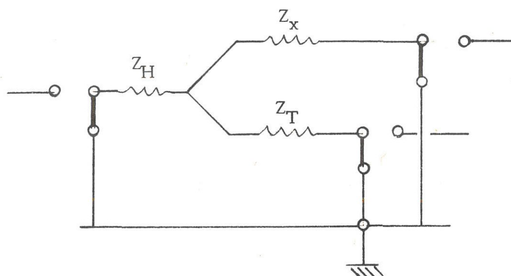
STO



Resulta sensato pensar que el equivalente de un transformador de tres devanados (autotransformador con terciario) es una combinación de los transformadores con conexión delta-estrella y estrella-estrella. Los textos dibujan el equivalente en forma general, de tal modo que pueda obtenerse para cualquier combinación de conexiones. La siguiente figura así lo indica



Este diagrama si se quiere puede obtenerse mediante una aplicación razonada del teorema de la superposición. Así, si todos los devanados estuvieran conectados en delta el equivalente tendría visto desde la red $Z_o = \infty$

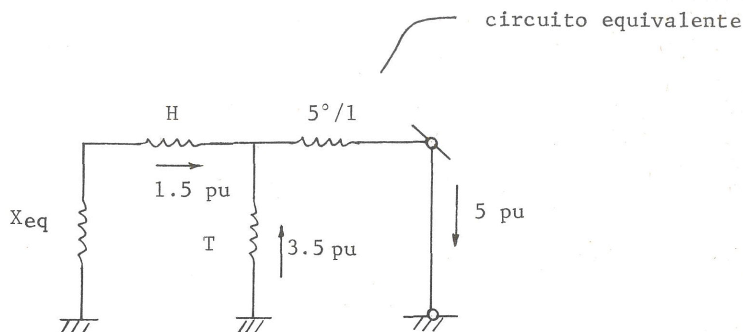


Cuando el equivalente corresponde a un autotransformador con terciario, se presenta la siguiente peculiaridad con respecto a la interpretación de los resultados obtenidos. Supongamos que la solución dio como resultado lo siguiente:

* NOTA: Z_H Z_X, Z_T provienen de la solución de un sistema de 3 ecuaciones con tres incognitas. -- Las variables por determinar a partir de los datos de placa Z_{HX} Z_{HT}, Z_{XT} (en pu y a la misma -- P_{base}) son precisamente Z_H Z_X y Z_T. El resulatado es:

$$Z_H = (Z_{HX} + Z_{HT} - Z_{XT})/2. \qquad Z_X = (Z_{HX} + Z_{XT} - Z_{HT})/2. \qquad Z_T = (Z_{HT} + Z_{XT} - Z_{HX})/2.$$

El procedimiento se aplica para formar el equivalente de transformadores de 3 devanados ó el de autotransformadores con terciario.



El cálculo se lleva a cabo con:

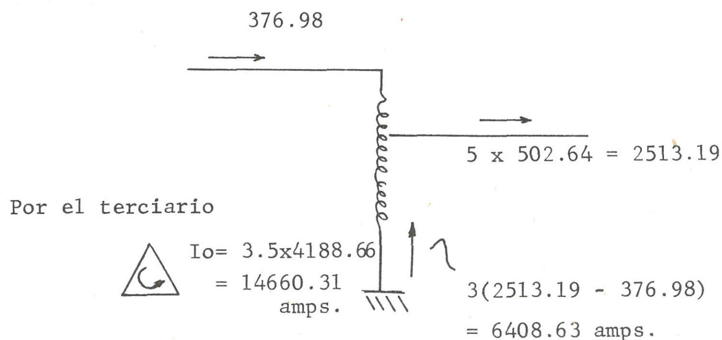
Pb = 100 MVA

$$I\ base_H = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 230} = 251.32 \text{ amps.}$$

$$I\ base_X = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 115} = 502.64 \text{ amps.}$$

$$I\ base_T = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 13.8} = 4188.66 \text{ amps.}$$

o sea que por los devanados del auto y por el neutro circularán:



La corriente de neutro (3Io = 6408.63 amps.) en este caso circula de neutro hacia los devanados; es frecuente que circule de los devanados hacia el neutro o sea es de dirección incierta, por esta razón no se puede usar para polarizar relés direccionales a menos que se compruebe su sentido para fallas en cualquier sitio y con cualquier configuración. La corriente de terciario (Io = 14660.31 amps.) tendrá siempre el mismo sentido y puede ser usada para fines de polarización.

7.- ASIMETRIA DE LA CORRIENTE DE FALLA.

Si suponemos que de manera instantánea aplicamos un C.C. trifásico en las terminales de una máquina síncrona con excitación constante y cero carga, la onda de corriente resultante consistirá de dos componentes:

1.- componente de ca
2.- componente unidireccional o componente de cd

La explicación clara respecto al tipo de onda viene considerando que estamos en presencia de un circuito RL predominantemente inductivo ($X \gg R$) para el cual es válido escribir:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = Vpk \operatorname{sen} (wt + \alpha)$$

o bien
$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{Vpk}{L} \operatorname{sen} (wt + \alpha)$$

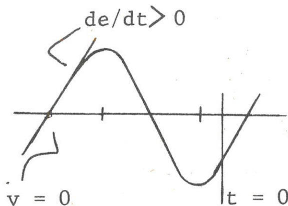
con i como variable dependiente y t como variable independiente. Esta ecuación admite como solución:

$$i = \frac{Vpk}{Z} \operatorname{sen} (wt + \alpha - \gamma) - \frac{Vpk}{Z} \operatorname{sen} (\alpha - \gamma) e^{-Rt/L}$$

Donde: $\frac{Vpk}{Z} \operatorname{sen}(wt + \alpha - \gamma)$ será la componente en estado permanente

$\frac{Vpk}{Z} \operatorname{sen}(\alpha - \gamma) e^{-Rt/L}$ será la componente en estado transitorio

γ.- es el desplazamiento angular expresado en radianes o grados entre el punto $v = 0$ y $t = 0$ medido positivamente o sea -- cuando $v = 0$ y de/dt es positiva



$$Z = \sqrt{R^2 + w^2 L^2} \qquad \alpha = \text{ang} \tan^{-1} \frac{wL}{R}$$

Ahora bien; para que no exista asimetría

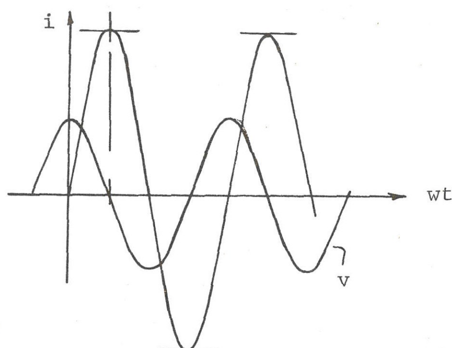
$$\frac{Vpk}{Z} \operatorname{sen} (\alpha - \gamma) e^{-Rt/L} = 0$$

esto sucede si $(\alpha - \gamma) = 0$

Si el circuito como se dijo en un principio es predominantemente inductivo, wL/R es grande de tal manera que $\gamma \doteq 90°$

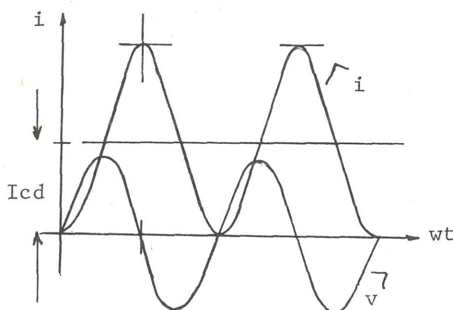
$$(\alpha - \gamma) = 0 \quad \text{si } \gamma = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}$$

Esto quiere decir que el transitorio es mínimo en circuitos inductivos -- cuando el corto ocurre en el punto de máximo voltaje.



Para máxima asimetría $\alpha - \gamma = 90°$ o sea $\gamma = 0, \pi, 2\pi$
De hecho, el transitorio es máximo si sen$(\alpha - \gamma)$ es 1 ó -1 esto por supuesto no implica que i sea máxima

La gráfica ilustra claramente el caso de máxima asimetría dependiendo en este caso de que la falla ocurra cuando $v = V_{máx}$.



El valor rms de una onda no-senoidal es:

$$I = \sqrt{I_c^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots I_n^2}$$

El valor rms de la corriente en cualquier instante es igual a la -- raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las componentes de ac y dc

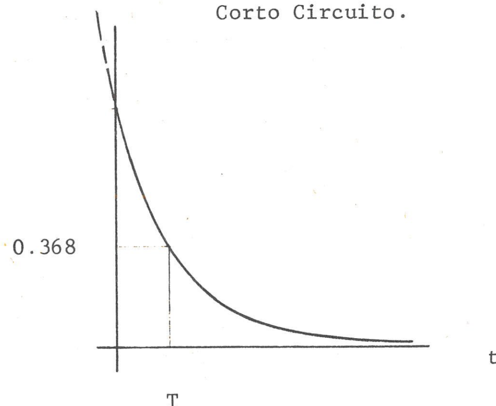
El valor máximo de Icd es $\sqrt{2}$ Irms

$$Icc = \sqrt{Icd^2 + Irms^2} = \sqrt{\left(\sqrt{2}\ Irms\right)^2 + Irms^2} = \sqrt{3}\ Irms =$$

$$= 1.73\ Irms$$

No existe que sostenga Icd; esta componente de directa se disipa en I^2R de hecho si R no existiera Icd sería constante hasta el libramiento del C.C.; al existir R se presenta el decremento, exponencialmente, de la envolvente:

constante de tiempo Se refiere a la rapidez del decremento. Es el tiempo requerido por Icd para verse reducida - al 37% de su valor original en el instante del Corto Circuito.

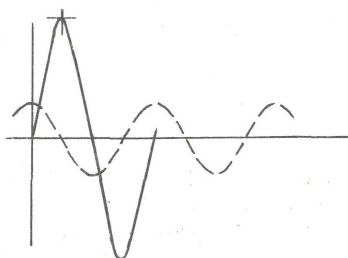


Dicho de otro modo: cuando t = T = constante de tiempo el valor de factor exponencial vale:

$$e^{-t/T} = e^{-1} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2.718} = 0.368$$

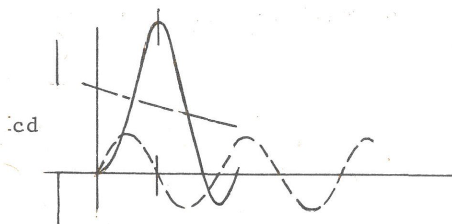
Otra forma, más simple, de entender el concepto sería la siguiente: La corriente de falla es de frecuencia igual a la frecuencia fundamental de la red. Consideremos una máquina en vacío girando excitada y súbitamente aplicamos un corto-circuito en sus terminales; lo único que limite su valor será la reactancia de máquina. Considerando que la corriente de falla estará 90° atrás del voltaje (circuito 100% inductivo) podemos analizar los extremos, ocurrencia de máxima y mínima asimetría.

1o. La falla ocurre cuando el voltaje es máximo (asimetría cero).



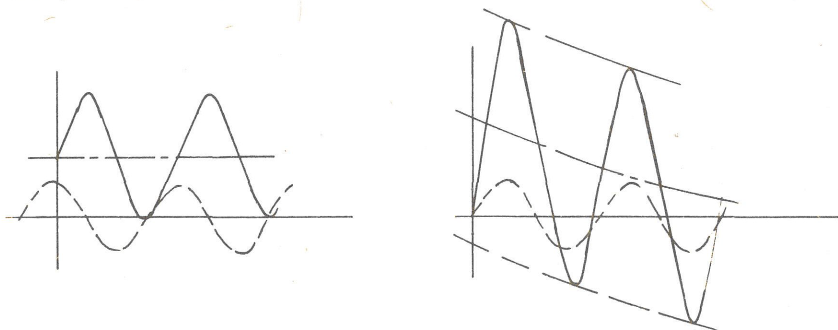
En forma natural la corriente queda 90° atrás del voltaje, sus máximos ocurren cuando v = 0 y se puede dibujar la onda con eje de simetría coincidente con el eje t

2o. La falla ocurre cuando el voltaje es mínimo (máxima asimetría)



En to(-) i vale cero, - -- transcurrido medio ciclo, i deberá alcanzar su máximo positivo 90° atrás de la tensión; como la frecuencia es igual a la frecuencia fundamental el máximo negativo ocurre medio ciclo después, el resultado es que el eje de simetría de la corriente queda a una distancia I_{cd} del eje t (Fig. 3)

Si el circuito no tuviera resistencia (R = 0) la componente de directa no decae; en el caso real R si existe y el producto $I_{cd}^2 R$ que hace que la componente disminuya exponencialmente (Fig.4) se disipa en pérdidas.



APENDICE A.-

Con objeto de graduar en forma ascendente el uso de los circuitos equivalentes de transformadores, cuando éstos están bajo la acción de la -- componente simétrica que no tiene secuencia (secuencia cero) o dicho de otro modo, la que se representa mediante tres fasores iguales en magnitud y dirección, procederemos como sigue:

Para todos los casos o configuraciones, como primer paso, vamos a recurrir al juego de reglas que deben respetarse cuando se hace uso de las componentes simétricas, una que resulta para este análisis excepcionalmente útil, dice: "El voltaje de secuencia cero es máximo en el punto de falla y disminuye conforme nos alejamos de él". Su interpretación práctica es como sigue: si aplicamos en un punto dado (F por ejemplo) un voltaje de secuencia cero de 1 pu, esto equivale a decidir que en -- ese punto ocurre una falla de fase a tierra, dicho de otro modo:

Para cuando ocurra una falla de fase a tierra en F ¿Cuál será la configuración de la malla de secuencia cero?

Si F es el punto de falla, habrá que aplicar ahí un voltaje $V_{ao} = 1$ pu y tratar de hacer circular por el banco corrientes con la identidad de la secuencia cero (iguales en magnitud y dirección). Si I_{ao} encuentra una trayectoria cerrada, Z_{ao} vale:

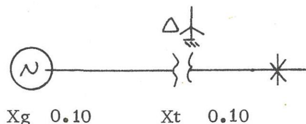
$$Z_{ao} = \frac{V_{ao}}{I_{ao}}$$

conocer Z_{ao} equivale a conocer la conformación de la malla.

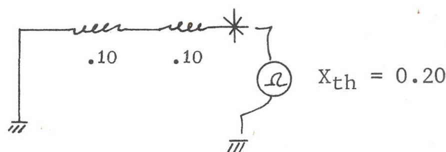
Ejemplo Núm. 1

En el diagrama se señalan parámetros y conexiones. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2} e I_{ao}?

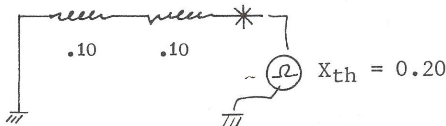
Sistema:



Red de secuencia (+)



Red de secuencia (-)

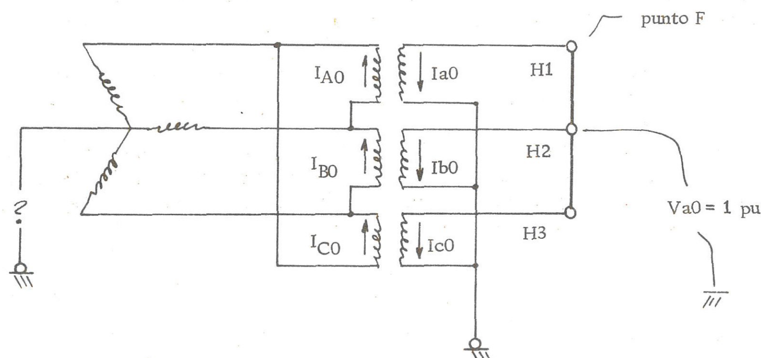


Red de secuencia (o).

Para obtenerla recurriremos a la siguiente figura , aplicamos -- V_{ao} = 1 pu en F y con objeto de hacer circular corrientes iguales en -- magnitud y dirección por los devanados de la estrella, ponemos en corto circuito H_1, H_2 y H_3. Resulta evidente que $I_{ao} = I_{bo} = I_{co}$ existen, es evidente también que I_{Ao}, I_{Bo} e I_{Co} son inducidos y se cumple que -

$$I_{Ao} = I_{Bo} = I_{Co}$$

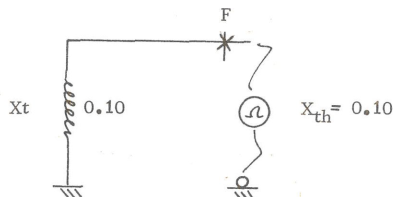
igualdad que lleva a la conclusión de que tales corrientes circulan forzosamente dentro de la delta.



Finalmente:
$$I_{ao} = \frac{V_{ao}}{Z_{ao}} = \frac{V_{ao}}{Z_t}$$

$Z_t = Z_{ao}$ = reactancia de dispersión del transformador.

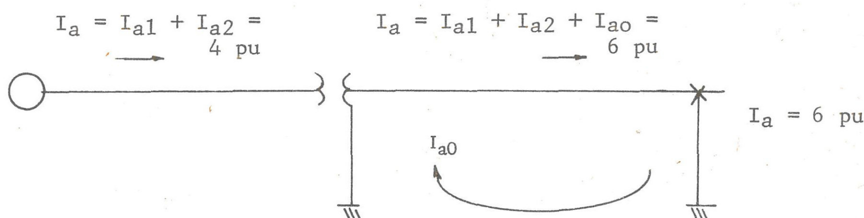
Red de secuencia cero:



Y:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{2X_1 + X_o} = \frac{1}{0.50} = 2 \text{ pu}$$

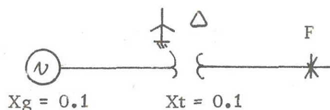
Distribución de las corrientes:



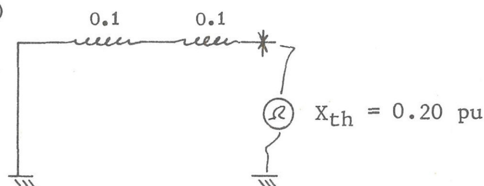
Ejemplo Núm. 2

En el diagrama se señalan parámetros, conexiones y el sitio donde ocu-- rre la falla. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2} e I_{ao}?

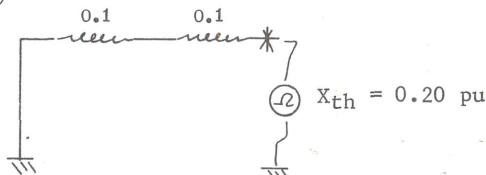
Sistema:



red de secuencia (+)

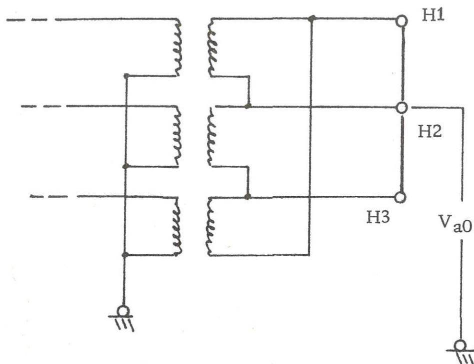


red de secuencia (-)



red de secuencia (o)

Circuito de prueba para medir Z_{ao}:



Como: $I_{ao} = o$

$Z_{ao} = \infty$

Y:

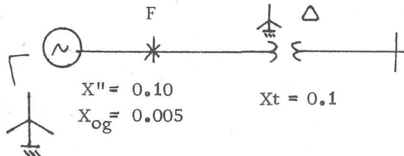
$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao}$

$$= \frac{1}{2X_1 + \infty} = 0$$

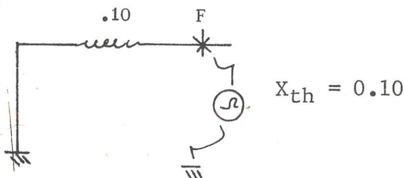
Ejemplo Núm. 3

En el diagrama se señalan parámetros, conexiones y sitio de falla. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2} e I_{ao}?

Sistema:

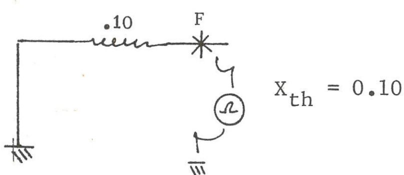


Red de secuencia (+)



$X_{th} = 0.10$

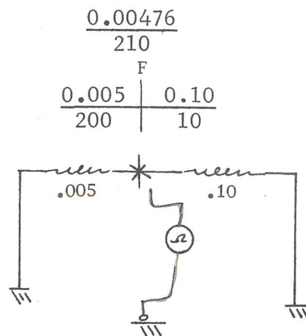
Red de secuencia (-)



$X_{th} = 0.10$

Aprovechando los resultados del ejemplo Núm. 1 podemos dibujar la red de secuencia cero.

Red de secuencia (o)



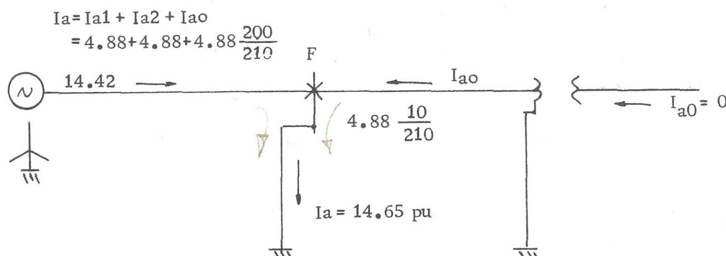
$$X_{tho} = \frac{(0.10)(0.005)}{0.105} =$$

0.00476 pu

Entonces:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{2X_1 + X_o} = \frac{1}{0.20 + 0.00476} = 4.8838 \text{ pu}$$

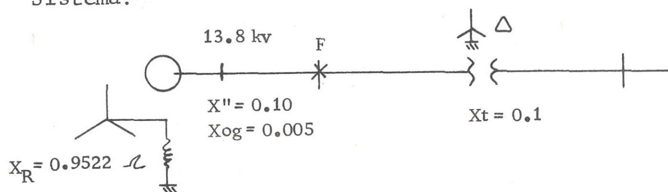
Y la distribución de las corrientes se muestra enseguida:



Ejemplo Núm. 4

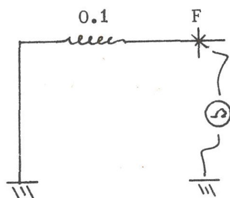
En el diagrama se señalan parámetros, conexiones y sitio donde ocurre la falla. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2} e I_{ao}? (Nótese que el neutro del generador está conectado a tierra a través de reactor).

Sistema:

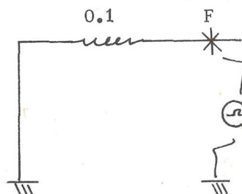


$$X_R = 0.9522 \frac{100}{13.8^2} = 0.50 \text{ pu}$$

Red de secuencia (+)

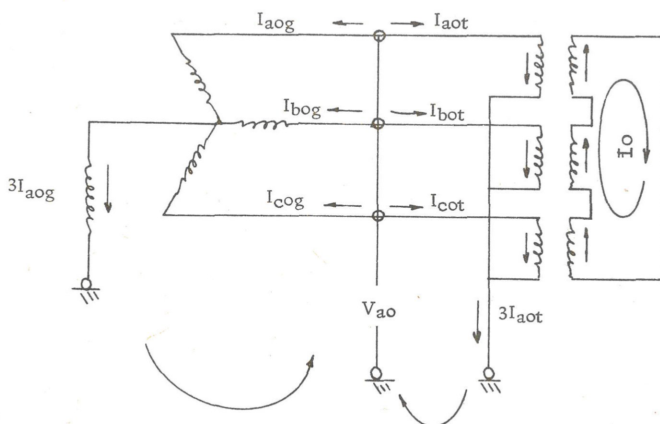


Red de secuencia (-)

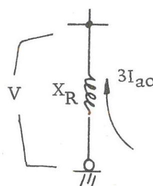


Red de secuencia (o)

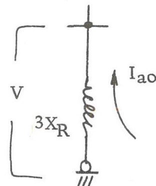
Circuito de prueba para medir Z_{ao}. En este caso, como consecuencia de la aplicación de V_{ao} la corriente total será la suma de dos aportaciones, una proveniente del transformador y otra proveniente del generador



Es de primordial importancia destacar el siguiente hecho: por la impedancia de la fase 'a' del transformador (Z_{aot}) circula I_{aot}, por la impedancia de la fase 'a' del generador (Z_{aog}) circula I_{aog}, en cambio -- por la impedancia del reactor de neutro (X_R) circula $3I_{aog}$. Los tres - elementos deben aparecer en la red de secuencia cero (red monofásica) - red que sirve para observar la circulación de I_{ao} no de $3I_{ao}$. Para lograr consistencia en los resultados se modifica la conexión de neutro - de la siguiente manera:



$V = (X_R)3I_{ao}$



$V = (3X_R)I_{ao}$

O sea que la red de secuencia cero se dibuja como sigue:

$\frac{0.09377}{10.6644}$

1.505	0.10
.6644	10

.005 .10

$3X_R = 1.5$ pu

Y: $I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \dfrac{1}{2X_1 + X_o} = \dfrac{1}{0.20 + .09377} = 3.404$ pu

Y las aportaciones valen:

$I_a = I_{aot} = 3.404 \dfrac{10}{10.6644} = 3.1919$ pu

$I_a =$

$= I_{a1} + I_{a2} + I_{ao} =$

$3.404 + 3.404 + 3.404 \dfrac{.6644}{10.6644}$

$= 7.02$

$3I_{ao} = 10.212$

Ejemplo Núm. 5

En el diagrama se señalan conexiones, parámetros y sitio donde ocurre - la falla. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2}, I_{ao} e I_a?

Sistema:

F

$X'' = 0.10$
$Xo = 0.005$

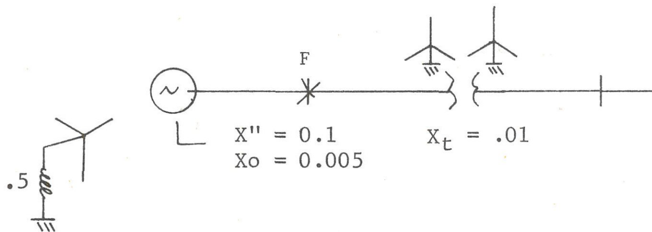
$Xt = 0.10$

$X_R = 0.5$

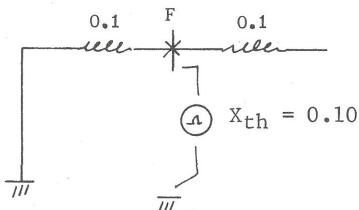
Ejemplo Núm. 5a

Se cambia, con respecto al problema Núm. 5, el sitio donde ocurre la falla.

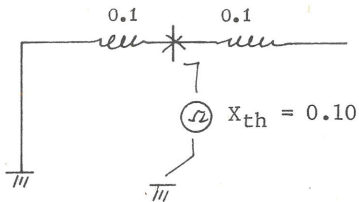
Diagrama del sistema:



Malla de secuencia (+)

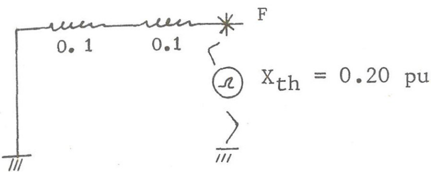


Malla de secuencia (-)

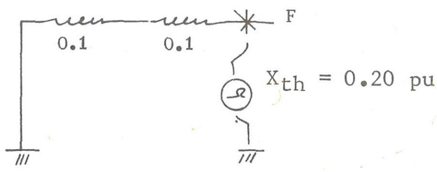


*** este espacio se deja en blanco intencionalmente ***

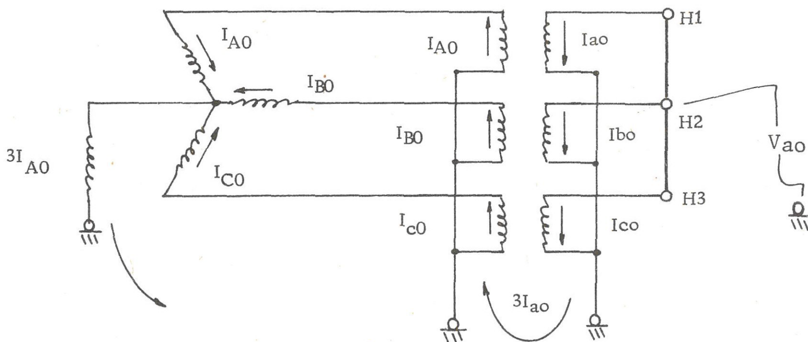
Red de secuencia (+)



Red de secuencia (-)

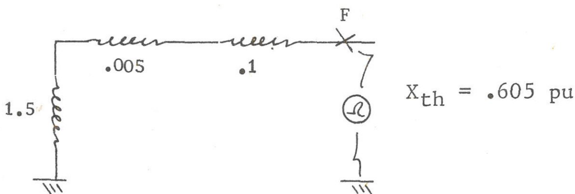


Circuito de prueba para medir Z_{ao}



Aprovechando los resultados de los problemas Núm. 1 y Núm. 4 podemos -- concluir:

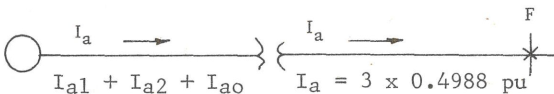
Red de secuencia cero:

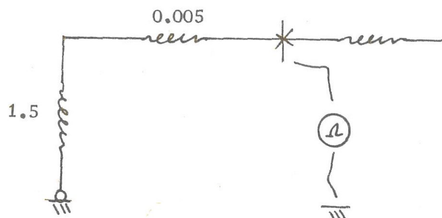


Como:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{0.4 + 1.605} = 0.4988 \text{ pu}$$

La distribución de las corrientes es como sigue:





Por lo tanto:

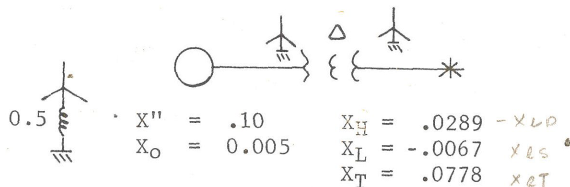
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{0.20 + 1.505} = .5865 \text{ pu}$$

Resulta evidente que el transformador estrella-estrella queda representado en esta malla como un circuito abierto.

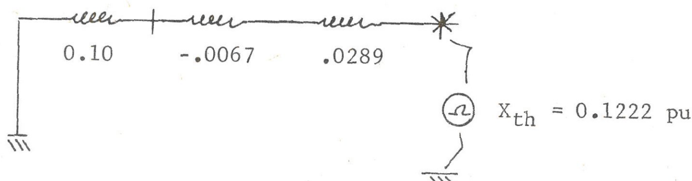
Ejemplo Núm. 6

El diagrama, las conexiones del transformador de tres devanados y el sitio de la falla se indican en la Fig. ¿Cuánto valen I_{a1}, I_{a2}, I_{ao} e I_a?

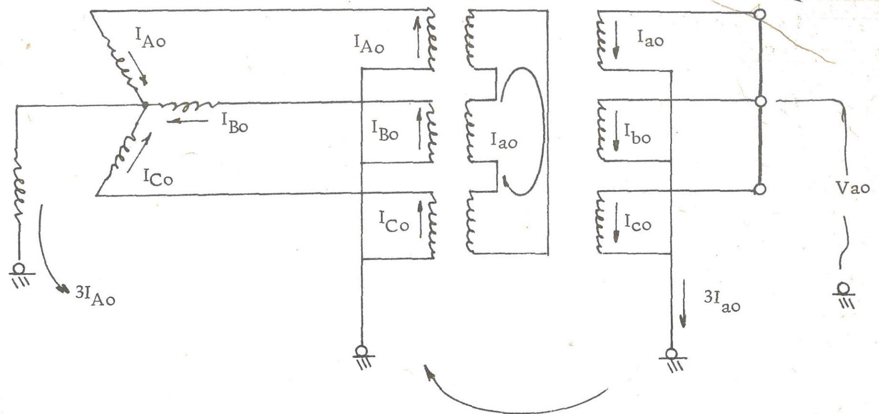
Sistema:



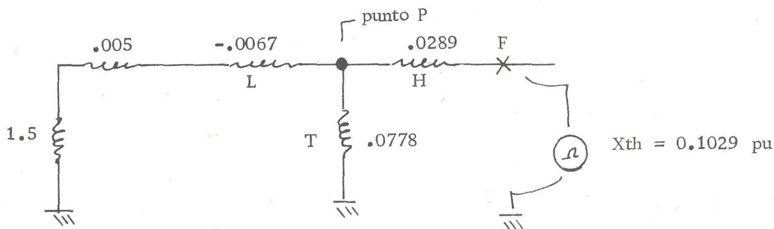
Redes de secuencia (+) y secuencia (-) (iguales)



Para obtener la red de secuencia cero, aplicaremos los conceptos anteriormente dichos en el siguiente circuito de prueba:



Los resultados son una superposición del ejemplo Núm. 1 y del Núm. 5, dicho de otro modo, es el comportamiento simultáneo de un banco delta - estrella y de uno estrella-estrella. Por lo tanto, puede dibujarse la malla de secuencia cero como sigue:



punto p

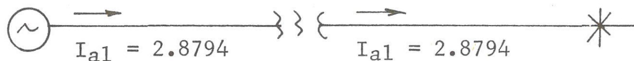
z/y	LT	0.074 / 13.5209	.0778 / 12.8535	T
z/y	L	1.498 / 0.6674		

De donde:

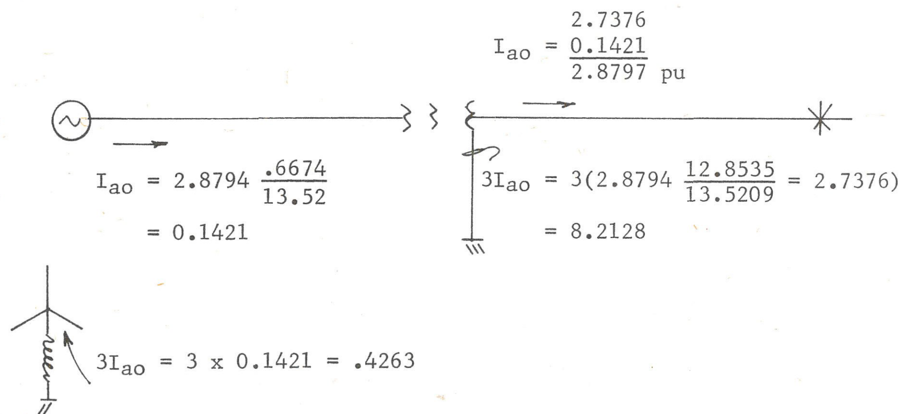
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{2 \times 0.1222 + 0.1029} = 2.8794 \text{ pu}$$

La distribución de las corrientes, ahora para cada secuencia, es como - sigue:

secuencia positiva y negativa:



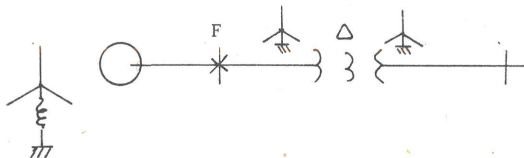
secuencia cero:



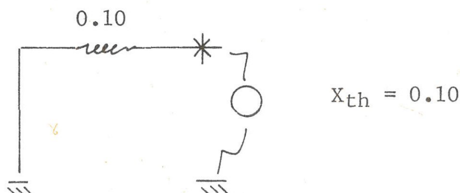
Ejemplo Núm. 6a

El mismo sistema que se empleó en el ejemplo Núm. 6, pero ubicando la - falla en un sitio distinto.

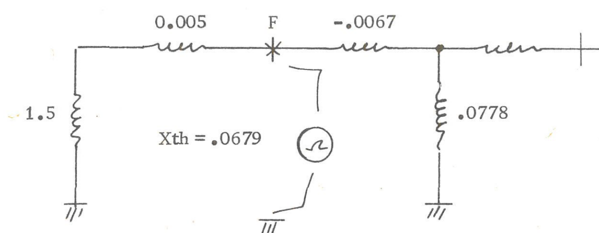
Sistema:



Red de secuencia positiva (igual a negativa):



Red de secuencia cero:



$$\frac{0.0679}{14.7291}$$

F

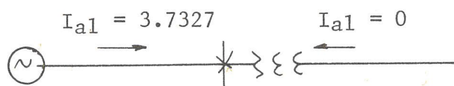
1.505	.0711
0.6645	14.0647

Por lo tanto:

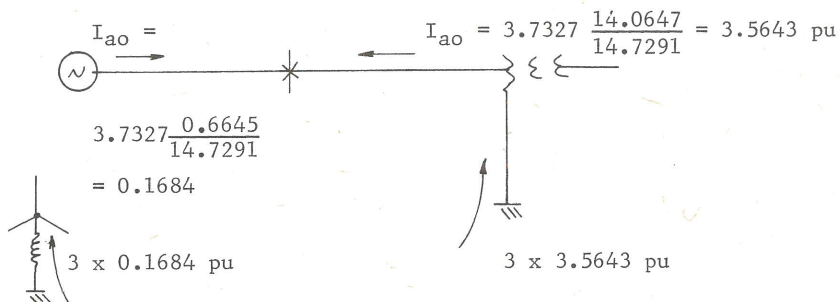
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{ao} = \frac{1}{.20 + .0679} = 3.7327 \text{ pu}$$

La distribución de las corrientes en cada malla es como sigue:

secuencia positiva y negativa:



secuencia cero:

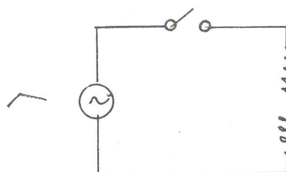


APENDICE B .- Transitorio en un circuito RL

En nuestro caso:

El switch puede cerrarse en cualquier instante por lo que α puede tener valores entre - - 0 - 2π rad/seg.

$v = V_{pk} \cos(wt + \alpha)$



Obviamente: $$Ri + \frac{Ldi}{dt} = V_{pk} \cos(wt + \alpha)$$

O bien: $$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{V}{L}pk \cos(wt + \alpha)$$

Ecuación de la forma:

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q(x)$$

Multiplicando por:

$$e^{\int Pdx} \left(\frac{dy}{dx} + Py\right) = e^{\int Pdx} Q(x)$$

El término de la izquierda es la derivada:

$$\frac{d}{dx}\left(e^{\int Pdx} y\right)$$ por lo que:

$$\frac{d}{dx}\left(ye^{\int Pdx}\right) = e^{\int Pdx} Q(x)$$

En nuestro caso: $$\frac{d}{dt}\left(ie^{\int Pdt}\right) = e^{\int Pdt} \frac{V_{pk}}{L} \cos(wt + \alpha)$$

Integrando obtenemos: $$ie^{\int Pdt} = \frac{V_{pk}}{L} \int e^{\int Pdt} \cos(wt + \alpha)dt + c$$

Multiplicado por $e^{-\int P dt}$ se obtiene

$$i = c\, e^{-\int P dt} + \frac{V_{pk}}{L}\, e^{-\int P dt} \int e^{\int P dt} \cos(wt + \alpha)$$

La integral $\int e^{\int P dt} \cos(wt + \alpha) dt$ se resuelve por partes

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Solución:

$$u = e^{\int P dt} \qquad dv = \cos(wt + \alpha) dt$$

$$du = P e^{\int P dt} dt \qquad v = \frac{1}{w} \operatorname{sen}(wt + \alpha)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{w} \cos(wx + \alpha) w$$

Entonces:

$$\int e^{\int P dt} \cos(wt + \alpha) dt =$$

$$\frac{1}{w}\, e^{\int P dt} \operatorname{sen}(wt + \alpha) - \frac{P}{w} \int e^{\int P dt} \operatorname{sen}(wt + \alpha) dt$$

2a. APLICACION:

$$u = e^{\int P dt} \qquad dv = \operatorname{sen}(wt + \alpha) dt$$

$$du = P e^{\int P dt} dt \qquad v = \frac{1}{w} \cos(wt + \alpha)$$

Entonces:

$$\int e^{\int P dt} \cos(wt + \alpha) dt = \frac{1}{w}\, e^{\int P dt} \operatorname{sen}(wt + \alpha) - \frac{P}{w} \left[-e^{\int P dt} \frac{1}{w} \cos(wt + \alpha) \right.$$

$$\left. + \frac{P}{w} \int e^{\int P dt} \cos(wt + \alpha) dt \right]$$

De donde:

$$\int e^{\int Pdt} \cos(wt + \alpha)dt \left[1 + \frac{P^2}{w^2}\right] = e^{\int Pdt} \left[\frac{P}{w^2} \cos(wt + \alpha) + \frac{1}{w} \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right]$$

$$\int e^{\int Pdt} \cos(wt + \alpha)d = \frac{w^2}{w^2 + P^2} e^{\int Pdt} \left[\frac{P}{w^2} \cos(wt + \alpha) + \frac{1w}{w} \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right]$$

$$= \frac{e^{Pdt}}{w^2 + P^2} \left[P \cos(wt + \alpha) + w \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right]$$

Sustituyendo el valor de la integral en la ecuación original

$$i = c\, e^{-\int Pdt} + \frac{V_{pk}}{L} e^{-\int Pdt} \frac{e^{\int Pdt}}{w^2 + P^2} \left[P \cos(wt + \alpha) + w \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right] =$$

$$c\, e^{-\int Pdt} + \frac{V_{pk}}{L(w^2 + P^2)} \left[P \cos(wt + \alpha) + w \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right]$$

como $P = R/L$

$$i = c\, e^{-(R/L)t} + \frac{V_{pk}}{L(w^2L^2 + R^2)} L^2 \left[\frac{R}{L} \cos(wt + \alpha) + \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right] =$$

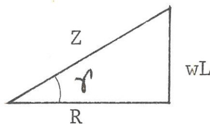
$$i = c\, e^{-(R/L)t} + \frac{V_{pk}}{w^2L^2 + R^2} \left[R \cos(wt + \alpha) + wL \operatorname{sen}(wt + \alpha)\right]$$

B-4

si $Z = \sqrt{R^2 + (wL)^2}$ $\qquad Z^2 = w^2L^2 + R^2$

$$i = c\, e^{-(R/L)t} + \frac{V_{pk}}{(R^2 + w^2L^2)^{1/2}} \left[\frac{R}{Z} \cos(wt + \alpha) + \frac{wL}{Z} \operatorname{sen}(wt + \alpha) \right]$$

Como:



$$\frac{R}{Z} = \cos \gamma \quad ; \quad \frac{wL}{Z} = \operatorname{sen} \gamma$$

Entonces:

$$\cos(wt + \alpha)\cos\gamma + \operatorname{sen}(wt + \alpha)\operatorname{sen}\gamma = \cos(wt + \alpha - \gamma)$$

$$i = c\, e^{(-R/L)t} + \frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \cos(wt + \alpha - \gamma)$$

Sólo resta conocer el valor de c

si $t = o$ $\quad i = o$ $\quad o = c + \dfrac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \cos(\alpha - \gamma)$

Entonces:

$$c = -\frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \cos(\alpha - \gamma)$$

Finalmente:

$$i = \frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \cos(wt + \alpha - \gamma) - e^{(-R/L)t} \frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \cos(\alpha - \gamma)$$

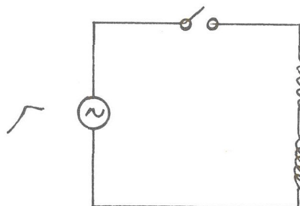
Resulta evidente que:

$\alpha - \gamma = n\pi$ para $n = 0, 1, 2, 3$ la componente de CD es máxima

$\alpha - \gamma = (1 + 2n)\pi$ para $n = 0, 1, 2, 3$ la componente de CD es cero

Si al principio hubiésemos aplicado una tensión senoidal (en el desarrollo anterior fue coseno) tal como se indica enseguida:

$$v = V_{pk} \ \text{sen}(wt + \alpha)$$



El resultado sería:

$$i = \frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \ \text{sen}(wt + \alpha - \gamma) - e^{-(R/L)t} \frac{V_{pk}}{\sqrt{R^2 + w^2L^2}} \ \text{sen}(\alpha - \gamma)$$

$d \ \text{sen} \ u = \cos u \ du$

$d \cos u = - \text{sen} \ u \ du$

$\int \text{sen} \ u \ du = - \cos u + c$

$\int \cos u \ du = \text{sen} \ u + c$

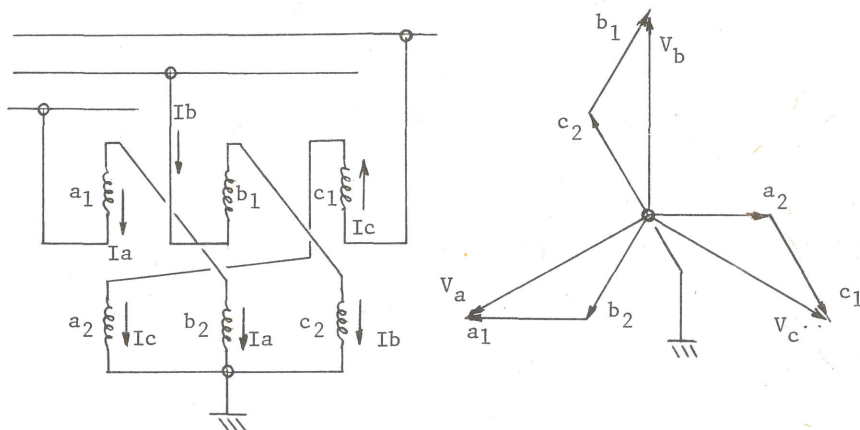
APENDICE C

SELECCION DE BANCOS DE TIERRA.

La conexión del banco de tierra a un "bus" o nodo tiene como finalidad principal reducir las sobretensiones que ocurren durante fallas monofásicas en un sistema sin referencia de tierra.

La reducción de las sobretensiones es mas efectiva si la relación X_o/X_1 es pequeña.

Las conexiones son las siguientes:



La peculiaridad de la conexión consiste en que:

Para sec (+) y (-) Z = oo (La impedancia de excitación)

Para sec (o) $Z = Z_{\ell}$ (La impedancia de disperción)

Los valores que deben especificarse son:

Datos
- KV del sistema
- I
  - valor nominal — soportado permanentemente
  - short time — amperes durante un tiempo

C-2

Análisis desde el punto de vista de componentes simétricas.

Es cierto que:

$$Ia_1 = Ia_2 = Ia_o = -j \frac{1}{2X_1 + X_o}$$

Asimismo:

$$Va_o = - Ia_o Z_o = \frac{X_o}{2X_1 + X_o} \quad ; \quad Va_2 = -\frac{X_1}{2X_1 + X_o}$$

Y:

$$Va_1 = - (Va_o + Va_2) = \frac{X_1 + X_o}{2X_1 + X_o}$$

Entonces si:

$$Vb = Vb_1 + Vb_2 + Vb_o$$

$$= a^2 Va_1 + aVa_2 + Va_o$$

$$= (- \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})Va_1 + (- \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})Va_2 + Va_o$$

$$= - \frac{1}{2}Va_1 - \frac{1}{2}Va_2 - j\frac{\sqrt{3}}{2}Va_1 + j\frac{\sqrt{3}}{2}Va_2 + Va_o$$

$$Vb = - \frac{1}{2}(Va_1 + Va_2) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(Va_1 - Va_2) + Va_o$$

Como: $Va = o = Va_1 + Va_2 + Va_o$;

$$- Va_o = Va_1 + Va_2$$

$$Vb = + \frac{1}{2} Va_o + Va_o - j\frac{\sqrt{3}}{2}(Va_1 - Va_2)$$

$$Vb = \frac{3}{2} Va_o - j\frac{\sqrt{3}}{2}(Va_1 - Va_2)$$

Si $Va_1 = \dfrac{X_1 + X_o}{2X_1 + X_o}$ y $Va_2 = - \dfrac{X_1}{2X_1+X_o}$ entonces $Va_1 - Va_2 = 1$

Y: $Vb = \sqrt{\frac{9}{4}\left|Va_o\right|^2 + \frac{3}{4}}$ $\qquad \left|Va_o\right| = \frac{2}{3}\sqrt{\left|Vb\right|^2 - \frac{3}{4}}$ (1)

O bien $\qquad \left|Va_o\right| = \dfrac{X_o}{2X_1 + X_o}$ (2)

De donde: $X_o = \dfrac{2X_1 \left|Va_o\right|}{1 - \left|Va_o\right|}$ (3)

Problema: Si KV = 34.5 ; MVA = 100 y X = 0.20 pu

Se pregunta:

a).- Cual es el valor de X_o del banco de tierra para que el voltaje de las fases no fallados sea cuando mucho

1.25 veces $V_N = 34.5/\sqrt{3}$

b).- Especificar la capacidad "SHORT TIME"

c).- Cual será la reactancia (X) del banco en ohms

Solución:

a).- De (B_1) $Va_o = \frac{2}{3}\sqrt{(1.25)^2 - 0.75} = 0.601$ pu

De (B_2) $X_o = \frac{2 \times 0.20 \times 0.601}{1 - 0.601} = 0.603$ pu

Como:

b).- $Ia_1 = Ia_2 = Ia_o = -j \frac{1.0}{2(0.20) + 0.603} = 0.997$ pu

$I_{Max} = Ia_o = 0.997 \frac{100000}{\sqrt{3} \times 34.5} = 1670.44$ amps

c).- De(B_3) $X_o = \frac{0.603 \times (34.5)^2 \times 10^3}{100000} = 7.177$

* Nota. Para determinar las capacidades de un banco de tierra se recomienda consultar el "Electrical Transmission and Distribution Reference Book de Westinghouse" Edición 1964 pág. 120

APENDICE D. Solución al problema de polarizacíon de relés de tierra cuando la fuente de secuencia cero es un autotransformador.

Existe un problema con la protección de tierra de líneas debido a la incertidumbre de la dirección de 3Io en el neutro de los Autotransformadores y debido a que 3Vo no está usualmente disponible por las siguientes razones.

Sabemos que el voltaje de polarización del relevador varía con la distancia al punto de falla; es máximo para falla cercana y disminuye para falla remota. Si a esto agregamos el hecho de que los transformadores de potencial suelen estar conectados al bus de baja tensión y las líneas por proteger salen del bus de alta, deducimos que para una falla alejada, la polarización resulta insegura. Con el siguiente arreglo logramos reproducir, en circuito secundario, la corriente del devanado terciario que adopta siempre para fallas a tierra la misma dirección y es por lo tanto, buena referencia para polarizar.

Arreglo:

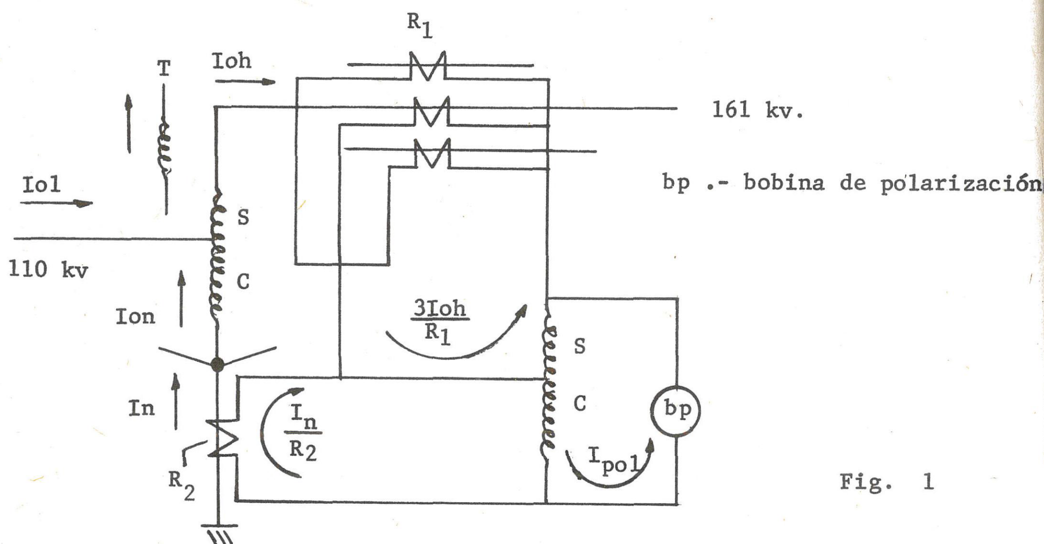


Fig. 1

T-S-C son las vueltas de los devanados terciario, serie y común

La suma de los amperes-vuelta de secuencia cero es:

$$SIoh + CIon + TIot = 0$$

O: $$Iol + Ion - Ioh = 0 \quad \text{(por pierna)}$$

Podemos, a partir de estas relaciones, obtener la corriente del terciario en función de las corrientes de los otros devanados.

$$Iot = -(SIol + SIon + CIon)/T$$

pero: $Iol + Ion = Ioh$

$$Iot = -(SIoh + CIon)/T \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

Dadas o conocidas las relaciones de los transformadores de corriente R_1 y R_2

De la figura 1 podemos concluir que $3Ioh/R_1$, In e Ipol están relacionadas por el TC auxiliar de la siguiente manera:

$$\frac{3SIoh}{R_1} - SIpol = CIpol - \frac{CIn}{R_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$(S+C)\ Ipol = \frac{3SIoh}{R_1} - \frac{CIn}{R_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

De la relación (1) obtenemos:

$$SIoh = CIon - TIot$$

$$3SIoh = 3CIon - 3TIot$$

Por lo que $\quad Ipol = \dfrac{3CIon - 3TIot}{R_1(S+C)} - \dfrac{CIn}{R_2(S+C)}$

Como: $3CIon = CIn$

$$Ipol = -\frac{3TIot}{R_1(S+C)} + \frac{CIn}{R_1(S+C)} - \frac{CIn}{R_2(S+C)}$$

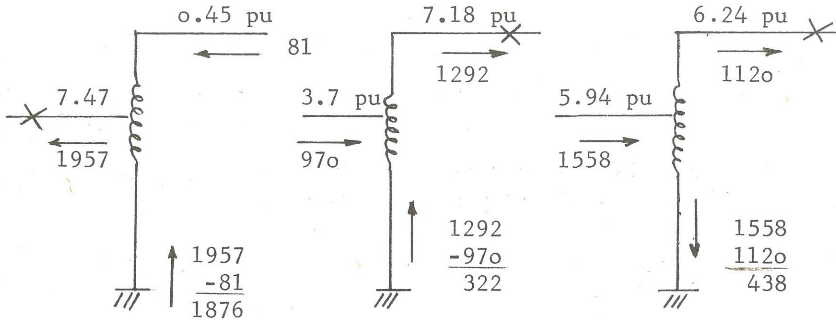
Si: $R_1 = R_2$ $\quad Ipol = \dfrac{-3T}{R(S+C)}\ Iot$

Si: $R_2 = 0.5R_1$

$$Ipol = \frac{-3TIot}{R\ (S+C)} + \frac{CIn}{(S+C)}\ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{0.5R_1}$$

$$Ipol = \frac{3TIot - CIn}{R_1(S+C)}$$

Supuestos los flujos de corriente que se señalan enseguida, obtenidos tal vez de un estudio de fallas, puede observarse que para (a) y (b) existe una dirección de Iot, para (c) existe dirección contraria

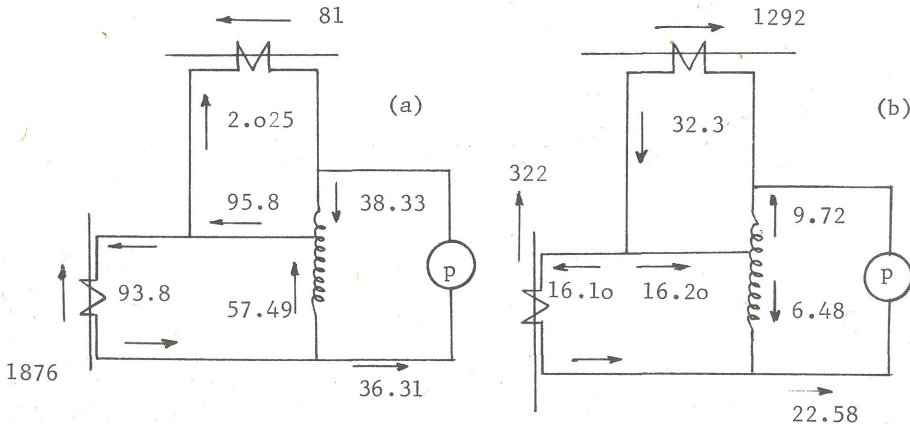


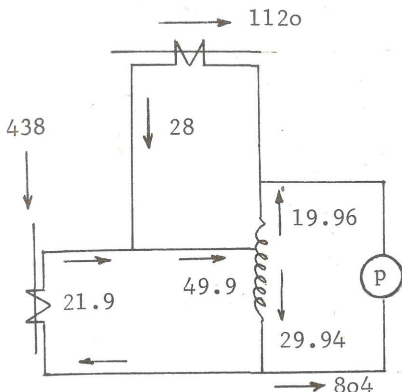
$$Iot = \frac{1839}{3}\ \frac{110}{\sqrt{3}\ x13.8} = \qquad Iot = \frac{626}{3}\ \frac{161}{\sqrt{3}\ x13.8} = \qquad Iot = \frac{54}{3}\ \frac{161}{\sqrt{3}\ x13.8}$$

= 2820 amps = 1410 amps = 121 amps

(a) (b) (c)

Analizando el comportamiento del arreglo propuesto, se observa para los tres casos:





(c) La operación es correcta.

$$\text{Relación} = \frac{161}{115} = \frac{.60}{.40}$$

S = C =

Comprobación:

Para (b).- $$I_{pol} = \frac{3TI_{ot} - CI_n}{R_1(S+C)} =$$

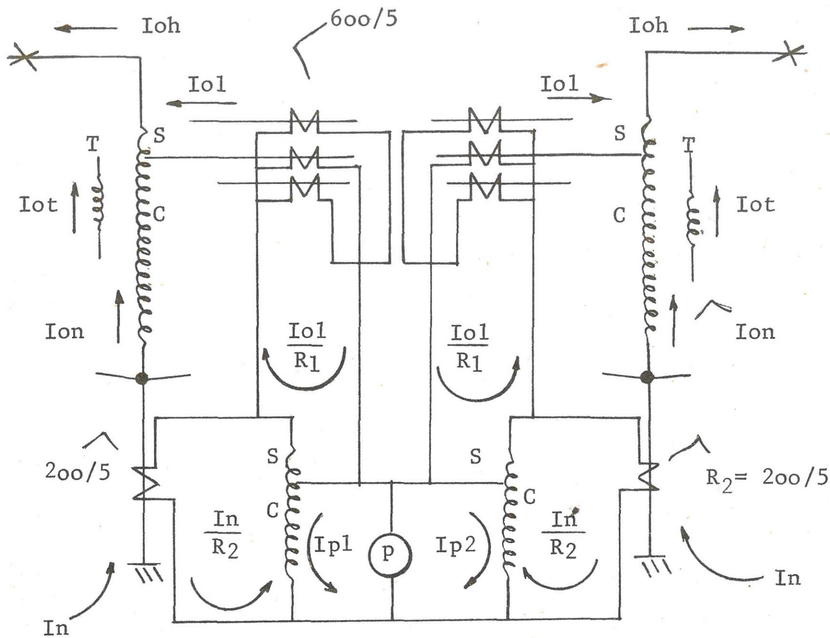
$$= \frac{-3\sqrt{3} \times 13.8 \times 1410 - 110 \times 322}{40\ (138 + 23)} =$$

$$= 21.18 \text{ amps.}$$

Un caso interesante y real es el siguiente:

En Poza Rica se necesita polarizar los relevadores de las líneas a Tampico (long=198 km) y Teziutlán con corriente. Existe el problema de que los autos no sirven para polarizar. Podríamos intentar llevar a cabo el siguiente arreglo:

Donde: $R_1 = 600/5$
$R_2 = 200/5$ $\qquad R_2 = \frac{R_1}{3}$



Las corrientes de acuerdo con la figura anterior, guardan la siguiente relación:

$$\frac{3SIol}{R_1} + \frac{SIn}{R_2} = CIp - \frac{CIn}{R_2}$$

$$CIp = \frac{3SIol}{R_1} + \frac{(S+C)}{R_2} In \qquad ....(1)$$

Pero: $Iot = -(SIol + SIon + CIon)/T$

$$TIot = -SIol - SIon + CIon$$

$$3TIot = -3SIol - 3Ion(S+C)$$

$$3TIot = -3TIot - (S+C)In$$

Substituyendo en 1:

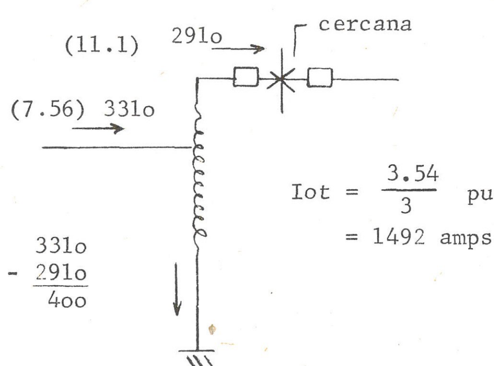
$$CIp = -\frac{3TIot}{R_1} - \frac{(S+C)In}{R_1} + \frac{(S+C)In}{R_2}$$

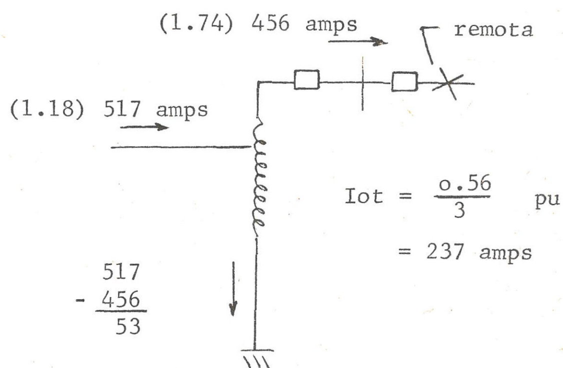
Si: $R_1 = R_2$ $\qquad CIp = \dfrac{-3T}{R_1} Iot$

Si: $R_2 = \dfrac{R_1}{3}$ $\qquad CIp = \dfrac{-3T}{R_1} Iot + \dfrac{-(S+C)In + 3(S+C)In}{R_1}$

$$CIp = \frac{-3T}{R_1} Iot + \frac{2(S+C)}{CR_1} In$$

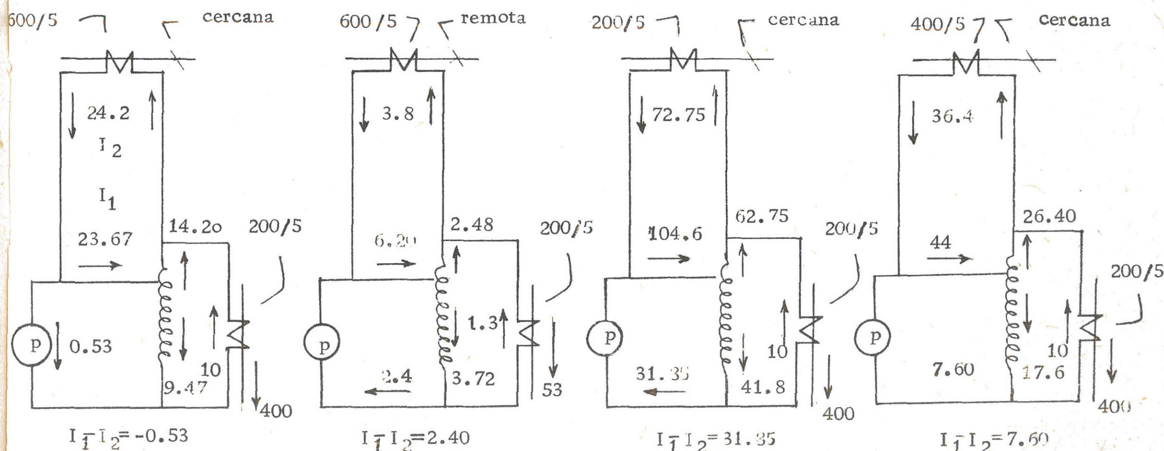
Para fallas, cercana y remota, tendríamos en circuito primario que:





Nota: entre paréntesis se anotan valores en pu.

Y en el circuito de polarización tendríamos que:



La diferencia $I_1 - I_2$ deberá ser positiva para obtener polarización correcta, por lo que para la figura 1, los TC=600/5 no sirven. Con TC=200/5 el esquema manejaría corrientes muy elevadas tal y como se muestra en la figura 3. El más adecuado es el de la figura 4 con TC=400/5

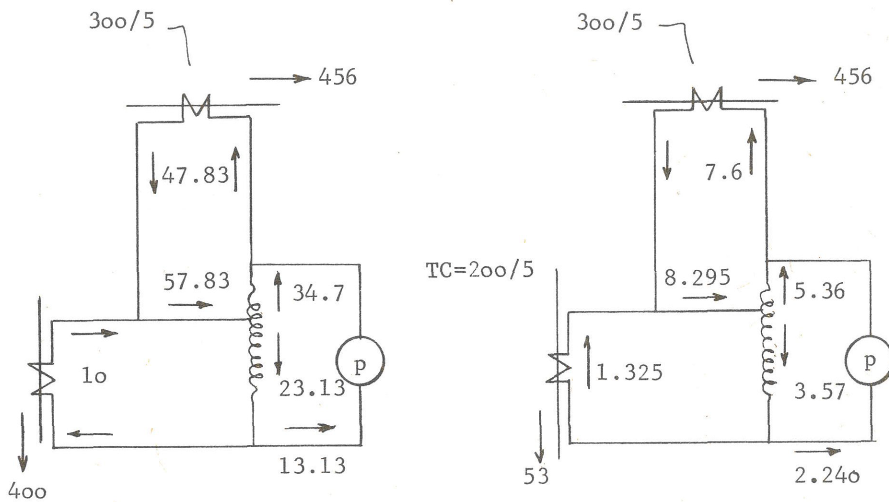
CONCLUSION:

El arreglo con TC's en el lado de baja tensión no puede llevarse a cabo, pues la relación requerida es 400/5. Modificar el actual de 600/5 involucraría cambios en los circuitos de corriente de las protecciones 87B y 87T lo cual no es conveniente. Podríamos usar el arreglo propuesto para Puebla II con los TC=300/5 instalados en el lado de alta tensión, con los siguientes resultados:

En este caso:

$$Ipol = \frac{-3Tiot - 0.5CIn}{R_1(S+C)}$$

Y en el circuito de polarización:

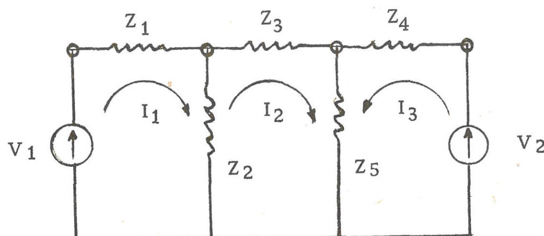


Como puede observarse, este esquema opera correctamente (faltaría - únicamente verificar para falla en BT).

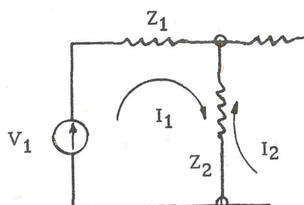
9.- ANALISIS POR EL METODO DE MALLAS.

Antecedentes

El análisis por mallas consiste en la aplicación de la Ley de Kirchhoff para voltajes; una vez seleccionadas las trayectorias cerradas por donde circularán las corrientes de malla, se plantean las ecuaciones considerando que la suma de voltajes a lo largo de la malla es cero.

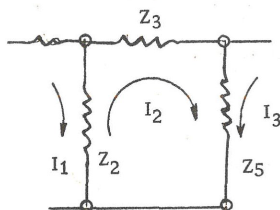


Evidentemente para la malla 1



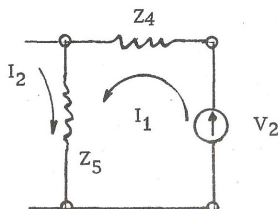
$$I_1Z_1 + (I_1 - I_2)Z_2 = V_1$$

para la malla 2



$$I_2Z_3 + (I_2 + I_3)Z_5 + (I_2 - I_1)Z_2 = 0$$

para la malla 3



$$I_3Z_4 + (I_3 + I_2)Z_5 = V_2$$

Agrupando estas ecuaciones obtenemos:

$$
\begin{aligned}
(Z_1 + Z_2)I_1 - \quad Z_2 I_2 &= V_1 \\
- Z_2 I_1 + (Z_2 + Z_3 + Z_5)I_2 + (Z_5)I_3 &= 0 \\
Z_5 I_2 + (Z_4 + Z_5)I_3 &= V_2
\end{aligned}
$$

Generalizando $V = Z_{loop} I$

ó

$$
\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}
$$

De lo anterior podrá concluirse:

a).- El número de mallas es: No. elementos - (No. nodos - 1)

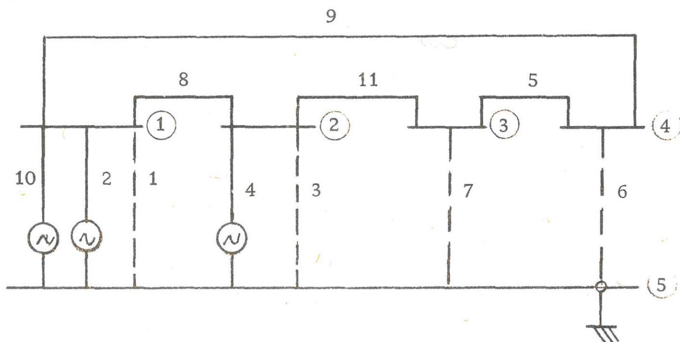
b).- La dirección de I_1, I_2 e I_3 se escoge arbitrariamente

c).- Z_{11} es la impedancia propia de la malla 1 y es la suma de todas las impedancias por donde circula I1
Z_{12} es la impedancia mutua entre las mallas 1 y 2, si por un elemento común a dos mallas las corrientes circulan en el mismo sentido el signo del elemento es positivo. Si por un elemento común a dos mallas las corrientes circulan en sentido contrario el signo del elemento es negativo.

d).- Z_{loop} contiene los coeficientes de las ecuaciones de malla.

e).- La matriz Z_{loop} puede formarse por inspección

Ejemplo: Se desea formar por inspección la matriz Z_{loop} del sistema eléctrico simplificado de la siguiente figura al cual se le han agregado conexiones con Z = 0 de cada nodo a referencia.
La numeración de nodos (5) y la de elementos (11) se ha escogido en forma arbitraria.



Elementos	Reactancia
1 - 2	0.1925
1 - 4	0.1348
1 - 5	0.1250
1 - 5	0.0
1 - 5	0.5070
2 - 3	0.0250
2 - 5	0.0
2 - 5	0.595
3 - 4	0.1043
3 - 5	0.0
4 - 5	0.0

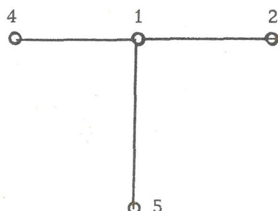
Elemento 1 - 2 no forma malla



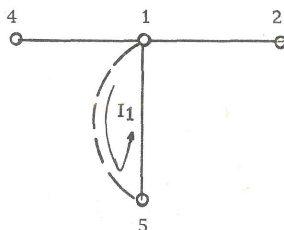
Elemento 1 - 4 no forma malla



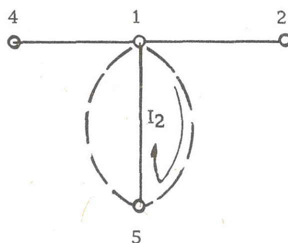
Elemento 1 - 5 no cierra malla



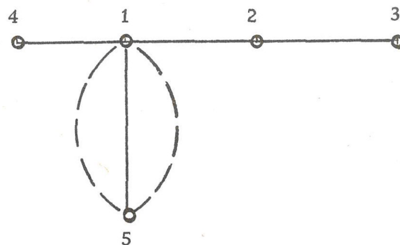
Elemento 1 - 5 forma la malla
(Se indica con línea punteada)
1,5,5,1



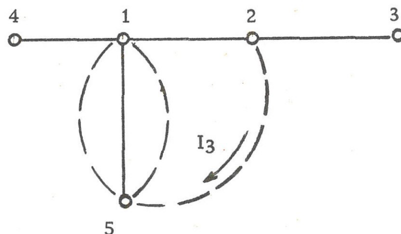
Se agrega el elemento 1 - 5
Forma la malla 1,5,5,1



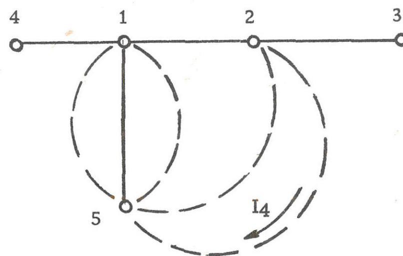
Se agrega el elemento 2 - 3
No forma malla



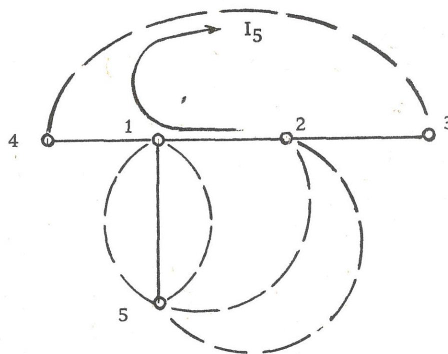
Se agrega el elemento 2 - 5
Forma la malla 2,5,1,2



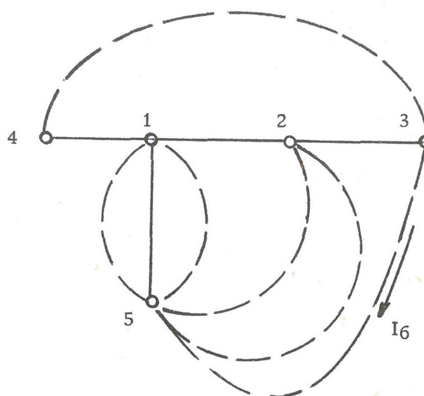
Se agrega el elemento 2 - 5
Forma la malla 2,5,1,2



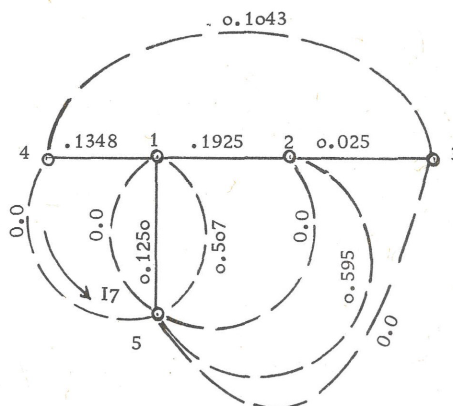
El elemento 3 - 4
Forma la malla 3,4,1,2,3



El elemento 3 - 5
Forma la malla 3,5,1,2,3



El último elemento 4 - 5
Cierra malla 4,5,1,4



El resultado da: Mallas = 7

# Elementos	=	11
# Nodos	=	5
Mallas	=	11-(5-1)= 7

De este análisis básico debe notarse lo siguiente: los elementos -- 1 - 2, 1 - 5, 1 - 4 y 2 - 3 son compartidos por varias mallas, o sea que por ellos podrán circular una o varias de las corrientes de I_1 a I_7. Por los elementos (con línea quebrada) 1 - 5, 1 - 5, 2 - 5 2 - 5, 3 - 4, 4 - 5 y 3 - 5 que fueron los últimos en ser agregados para formar la trayectoria cerrada, sólo circula una corriente de -- malla siempre de número menor a mayor que queda definido como sentido positivo.

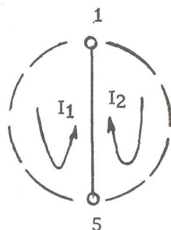
Con base en lo anterior, podemos aventurarnos para formar por inspección Z_{loop}

Z_{11} = suma de impedancias (en nuestro caso reactancias) por las que circula I_1

Z_{11} = 0.1250 + 0.0 = 0.1250

Z_{12} = impedancia común a I_1 e I_2; positiva si ambas corrientes circulan en el mismo sentido, negativa si el sentido es contrario

Z_{12} = 0.1250



Aplicando los mismos conceptos se obtienen sucesivamente

Z_{13} = 0.1250
Z_{14} = 0.1250
Z_{15} = 0.0
Z_{16} = 0.1250
Z_{17} = 0.1250

lo que da completo el primer renglón de la matriz Z_{loop}

Finalmente, la matriz completa se anota enseguida:

0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.0	0.1250	0.1250
0.1250	0.6320	0.1250	0.1250	0.0	0.1250	0.1250
0.1250	0.1250	0.3175	0.3175	0.1925	0.1250	0.3175
0.1250	0.1250	0.3175	0.9125	0.1925	0.1250	0.3175
0.0	0.0	0.1925	0.1925	0.4566	-0.1348	0.2175
0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	-0.1348	0.2598	0.1250
0.1250	0.1250	0.3175	0.3175	0.2175	0.1250	0.3425

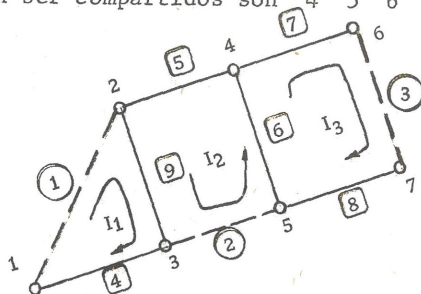
Cuando la red es compleja las posibilidades de éxito al formar Z_{loop} por inspección disminuyen sensiblemente.

Para formar esta matriz en forma mecanizada, se procede con base en los siguientes soportes teóricos:

Matriz de Conexión

Es una matriz cuyos elementos son unos o ceros y que informan sobre la configuración de la red a la cual pertenece.

La red de la siguiente figura contiene tres mallas. Los elementos que contienen una sola corriente de malla son 1 2 y 3 . Los elementos que pueden ser compartidos son 4 5 6 7 8 y 9



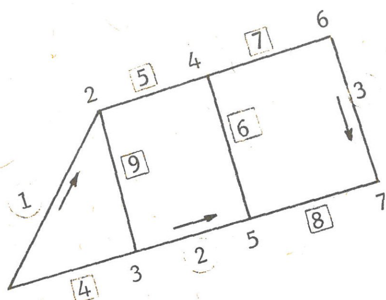
Los primeros llamados "links" en número son iguales al número de mallas independientes, por lo que la corriente en el "link" es igual a la corriente de malla. La convención de signos es válida para ambos; positivo si la corriente va de número menor a mayor y negativo si sucede lo contrario. Por lo tanto: podemos obtener por inspección las corrientes de los elementos en función de las corrientes de malla

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

Simplificando $\left[I_b\right] = \left[T'\right]\left[I_\ell\right]$

La matriz de unos y ceros así formada es la transpuesta de la matriz de conexión $\left[T\right]$

Para tensiones: si llamamos como V a las caídas de voltaje en los elementos y E a los voltajes generados, obtenemos:



para la malla 1

$$V_1 + V_9 - V_4 = E_1 + E_9 - E_4$$

para la malla 2

$$V_2 - V_6 - V_5 + V_9 = E_2 - E_6 - E_5 + E_9$$

para la malla 3

$$V_3 - V_8 - V_6 + V_7 = E_3 - E_8 - E_6 + E_7$$

o, si se quiere:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \\ E_7 \\ E_8 \\ E_9 \end{bmatrix}$$

Simplificando $\quad T\,V_b = T\,E_b$

T es la matriz de conexiones y su transpuesta coincide con T' obtenida anteriormente.

Si Z_b contiene las impedancias propias y mutuas de todos los elementos que configuran la red, entonces:

$$V_b = Z_b\, I_b$$

premultiplicando por T obtenemos: $TV_b = TZ_b\, I_b$ como: $I_b = T'\, I_\ell$

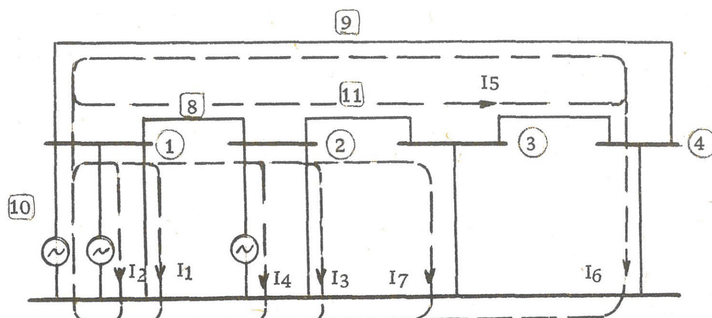
entoces:

$$TV_b = TZ_bT'I_\ell$$

$$= (TZ_bT')I_\ell$$

(TZ_bT') es la matriz de coeficiente de las ecuaciones de malla que se obtuvo anteriormente por inspección.

Para la red simplificada, obtendremos la matriz T por inspección, - con objeto de comparar este resultado con el obtenido mediante un -- proceso mecanizado. Así:



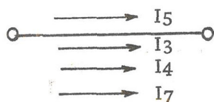
como $I_b = T'I_\ell$

$$\begin{bmatrix} I_8 \\ I_9 \\ I_{10} \\ I_{11} \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix}$$

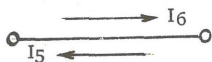
Si I_b es de 4 x 1
I_ℓ es de 7 x 1
T' es de 4 x 7

4 x 1 = 4 x 7 x 7 x 1

por el elemento # 8 circulan $+I_3$, $+I_4$, $+I_5$, $+I_7$



por el elemento # 9 circulan $-I_5$ $+I_6$



por el elemento # 10 circulan $-I_1$, $-I_2$, $-I_3$, $-I_4$, $-I_6$ $-I_7$

y por el elemento # 11 circulan $+I_5$, $+I_7$

por lo tanto:

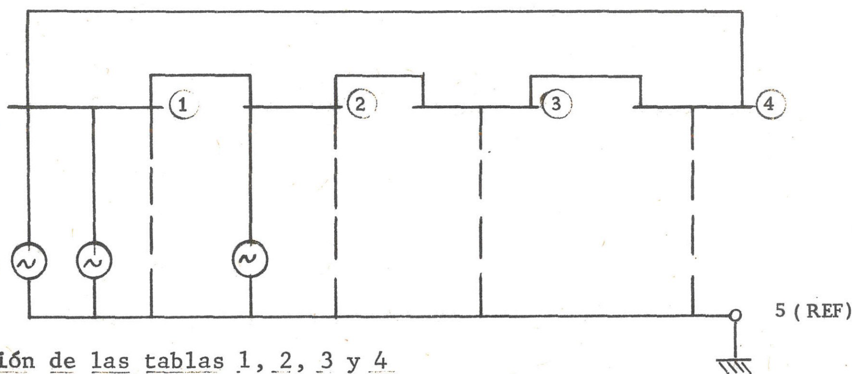
$$\begin{bmatrix} I_8 \\ I_9 \\ I_{10} \\ I_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix}$$

por lo tanto $[T s]$ es:

$$[T_s'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Procedimiento topológico para obtener Z_{loop}

En el diagrama simplificado de la red se numeran los buses en forma - arbitraria, cuidando que el número mayor corresponda al nodo de referencia. En el caso actual hemos hecho coincidir la numeración con la previamente escogida para poder llevar a cabo la comparación requerida.



Formación de las tablas 1, 2, 3 y 4

La tabla 1 se forma de manera disciplinada, anotando consecutivamente los elementos que salen de bus 1, de bus 2, de bus 3, etc. (números menores que el bus considerado no se anotan en la tabla)

NOTA: $[T_s]$ es sub-matriz ó parte de la matriz $[T]$ .En realidad para obtener $[F]$ a partir de $[T_s]$ habría que agregar a $[T_s]$ la matriz identidad I

TABLA 1

ele	ns	ne
1	1	2
2	1	4
3	1	5
4	1	5
5	1	5
6	2	3
7	2	5
8	2	5
9	3	4
10	3	5
11	4	5

TABLA 2

link	ns	ne
1	1	5
2	1	5
3	2	5
4	2	5
5	3	4
6	4	5
7	3	5

TABLA 3

branch	ns	ne
8	1	2
9	1	4
10	1	5
11	2	3

TABLA 4

2 4 5 3

A partir de la tabla 1 se forman las tablas 2 y 3, de la siguiente manera:

elemento 1 une 1 con 2

Por ser el primer elemento, es necesariamente un branch y va a la tabla 3.

elemento 2 une 1 con 4

Se compara el nodo 4 con los nodos anotados en la tabla 3, dado que es distinto, es un branch y se anota en la tabla 3.

elemento 3 une 1 con 5

Se compara el nodo 5 con los nodos anotados en la tabla 3, dado que es distinto a 2 y 4, es un branch y se anota en la tabla 3.

elemento 4 une 1 con 5

Se compara el nodo 5 con los nodos anotados en la tabla 3, dado que ya existe 5 en el tercer renglón este elemento es link y se anota en la tabla 2.

elemento 5 une 1 con 5

Por estar contabilizado 5 en la tabla 3, este nuevo elemento es link y se anota en la tabla 2.

En este momento se termina de analizar el nodo 1 en la tabla 1, o sea, se terminaron los elementos que conectan el nodo 1 con la red. En este momento las tablas 2 y 3 contienen la siguiente información:

tabla 2	tabla 3	tabla 4
1 - 5	1 - 2	2, 4, 5
1 - 5	1 - 4	
	1 - 5	

La tabla auxiliar 4 se forma con los elementos de la derecha de la tabla 3 y se procede a buscar las conexiones del primer nodo de la tabla 4 con el resto de la red.

elemento 1 une 1 con 2

El nodo 2 es mayor que 1 lo que indica que ya fué analizado.

elemento 6 une 2 con 3

El nodo 3 no aparece en la tabla 4, lo que indica que es primera vez que se menciona; por lo tanto, es branch y se anota en la tabla 3 y en la tabla 4

elemento 7 une 2 con 5

El nodo 5 aparece a la derecha de 2 en la tabla 4, por lo tanto es link y se anota en la tabla 2.

elemento 8 une 2 con 5

Por lo dicho en el párrafo anterior, se anota en la tabla 2.

En este momento la búsqueda del nodo 2 en la tabla 1 finaliza y las tablas 2, 3 y 4 aparecen con la siguiente información:

Tabla 2	Tabla 3	Tabla 4
1 - 5	1 - 2	2, 4, 5, 3
1 - 5	1 - 4	
2 - 5	1 - 5	
2 - 5	2 - 3	

El siguiente nodo será el indicado en forma consecutiva por la tabla 4 o sea 4

elemento 2 une 1 con 4

El número 4 es mayor que 1, lo que indica que ya fue contabilizado

elemento 9 une 3 con 4

En la tabla 4 el nodo 3 aparece a la derecha de el nodo 4, por lo tanto debe ser link y anotado en la tabla 2.

elemento 11 une 4 con 5

En la tabla 4 el nodo 5 está a la derecha del nodo 4, por lo tanto es link; se contabiliza en la tabla 2.

Termina la búsqueda del nodo 4, las tablas 2 y 3 aparecen como:

Tabla 2	Tabla 3	Tabla 4
1 - 5	1 - 2	2, 4, 5, 3
1 - 5	1 - 4	
2 - 5	1 - 5	
3 - 4	2 - 3	
4 - 5		

El siguiente nodo será 5 tal como lo indica la tabla 4.

Los elementos 3, 4, 5 no interesan

elemento 7 une 2 con 5
elemento 8 une 2 con 5

En la tabla 4 el nodo 2 aparece a la izquierda de 5, lo que indica que ya fue analizado.

elemento 10 une 3 con 5

En la tabla 4 el nodo 3 aparece a la derecha de 5, por lo que será link

elemento 11 une 4 con 5

En la tabla 4 el nodo 4 aparece a la izquierda de 5, lo que indica que ya fue analizado.

Finalmente, el resultado de la aplicación del procedimiento da:

11 elementos
7 links
4 branches

números que coinciden con los obtenidos por inspección.

El procedimiento continúa con la formación de las tablas 5 y 6 a partir de 2 y 3 con la siguiente filosofía:

TABLA 2			TABLA 3			TABLA 5		TABLA 6	
ele	ns	nr	ele	ns	nr	nodos	links	nodos	branches
1	1	5	8	1	2	2	3 4	2	-8, 11
2	1	5	9	1	4	3	5 7	3	-11
3	2	5	10	1	5	4	-5 6	4	-9
4	2	5	11	2	3	5	-1-2-3-4-6-7	5	-10
5	3	4							
6	4	5							
7	3	5							

La tabla 5 corresponde a la tabla 2, se excluye en la lista de nodos el número 1. En la tabla 2 se inicia una búsqueda del nodo 2, aparece en los renglones correspondientes a los elementos 3 y 4 en ambos como nodo de salida (ns), por lo tanto el nodo 2 contiene los links 3, 4.

Tabla 5

nodo	links
2	3, 4

De la búsqueda del nodo 3 se concluye que contiene a los links 5 y 7 y en ambos como nodo de salida (ns)

Tabla 5

nodo	link
3	5, 7

De la búsqueda del nodo 4, se concluye que forma parte de la conexión de los links 5 y 7, en el primero figura como nodo de llegada (nr) y en el segundo como nodo de envío (ns), por lo tanto:

Tabla 5

nodo	link
4	-5, 6

El signo - porque aparece como (nr)

Finalmente, el nodo 5 forma parte de los links 2, 3, 4, 6 y 7 en todos como nodo de llegada (nr), por lo tanto

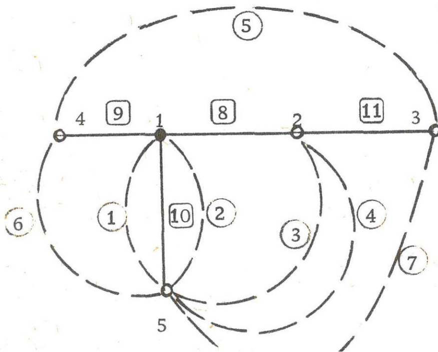
Tabla 5

nodo	link
5	-1,-2,-3,-4,-6,-7

Este procedimiento se repite para la tabla 3 que da como resultado la número 6.

NOTA:

Si observamos la gráfica de la red, notaremos que:



del nodo 2 emanan los links 3 y 4
del nodo 3 emanan los links 5 y 7
del nodo 4 emanan los links -5 y 6
y del nodo 5 -1,-2,-3,-4,-6 y -7

Así mismo:	del nodo	2	emanan los branches	-8 y 11
	del nodo	3		-11
	del nodo	4		-9
	y del nodo	5		-10

o sea que conocida la gráfica se pueden obtener directamente las tablas 5 y 6

Obtención de la matriz T por columnas

Si se desea formar la columna # 8 de la matriz T se procede como sigue: se explora la tabla 6, buscando el ele 8 que deberá aparecer en primer término; lo encontraremos en el renglón correspondiente al nodo 2 junto con 11, el número 8 ya no aparece en la tabla, el número 11 aparece en el renglón correspondiente al nodo 3 pero está solo. Si se respetan las siguientes reglas:

- Si el primer número de rama en la tabla 6 es negativo, el primer nodo será suprimido, así como los números de nodo repetidos y los "links" obtenidos de la tabla 5 serán puestos con 1 ó -1 en la columna de la matriz T sin cambio de signo.

- Si el primer número de rama en la tabla 6 es positivo, el segundo nodo obtenido de la tabla 3, será suprimido, así como las repeticiones, sacamos los "links" de la tabla 5 y les cambiamos signo antes de anotarlos en la columna de la matriz T.

Para 8 el signo es negativo

-8 11
11 solo

8 une ~~1~~ - 2
11 une ~~2~~ - 3

quedan 2, 3 que según la tabla 5 contienen

2 a 3 y 4
3 a 5 y 7

por lo tanto

8
0
0
1
1
1
0
1

Para 9 signo negativo

```
              -9   solo
             /
   9  une   1 - 4
      queda     4   que contiene (tabla 5) a -5 y 6
```

por lo tanto

9
0
0
0
0
-1
1
0

Para 10 signo negativo

```
              -10   solo
             /
   10  une   1 - 5
       queda     5   que contiene a -1,-2,-3,-4,-6,-7
```

por lo tanto

10
-1
-1
-1
-1
0
-1
-1

La submatriz de Ts será:

Ts =

(8)	(9)	(10)	(11)
0	0	-1	0
0	0	-1	0
1	0	-1	0
1	0	-1	0
1	-1	0	1
0	1	-1	0
1	0	-1	1

que es idéntica a la obtenida por inspección.

Las "ramas de árbol" se obtienen a partir de la tabla 6

el árbol es: y las ramas son:

4 [9] 1 [8] 2 [11] 3

[10]

4 [9] 1   1 [8] 2 [11] 3

1 [10] 5

como:

$$\begin{bmatrix} I_\ell \\ \hline I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ \hline T_s' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\ell \end{bmatrix} \qquad 11 \times 1 = 11 \times 7 \; 7 \times 1$$

La matriz T completa así como la Z primitiva se anotan enseguida:

T =

1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	-1.	0.
0.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	-1.	0.
0.	0.	1.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	-1.	0.
0.	0.	0.	1.	0.	0.	0.	1.	0.	-1.	0.
0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	1.	-1.	0.	1.
0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	1.	-1.	0.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	1.	0.	-1.	1.

Zp=

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.5070	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.5950	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1043	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0,0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1925	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1348	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1250	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0250

La matriz Z LOOP resultado del programa HAWK03 es la que se muestra enseguida:

MATRIZ Z BUS.

0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.0	0.1250	0.1250
0.1250	0.6320	0.1250	0.1250	0.0	0.1250	0.1250
0.1250	0.1250	0.3175	0.3175	0.1925	0.1250	0.3175
0.1250	0.1250	0.3175	0.9125	0.1925	0.1250	0.3175
0.0	0.0	0.1925	0.1925	0.4566	-0.1348	0.2175
0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	-0.1348	0.2598	0.1250
0.1250	0.1250	0.3175	0.3175	0.2175	0.1250	0.3425

En esta última matriz (Z primitiva) deben anotarse en el orden establecido, las impedancias propias y mutuas de todos los elementos de_ la red, las propias ocuparán la diagonal principal.

La matriz Z_{loop} resultado del producto $[TZ_bT']$ es:

$$
Z_{loop} = \begin{matrix}
0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.0 & 0.1250 & 0.1250 \\
0.1250 & 0.6320 & 0.1250 & 0.1250 & 0.0 & 0.1250 & 0.1250 \\
0.1250 & 0.1250 & 0.3175 & 0.3175 & 0.1925 & 0.1250 & 0.3175 \\
0.1250 & 0.1250 & 0.3175 & 0.9125 & 0.1925 & 0.1250 & 0.3175 \\
0.0 & 0.0 & 0.1925 & 0.1925 & 0.4566 & -0.1348 & 0.2175 \\
0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & -0.1348 & 0.2598 & 0.1250 \\
0.1250 & 0.1250 & 0.3175 & 0.3175 & 0.2175 & 0.1250 & 0.3425
\end{matrix}
$$

Artificio para la medición de la impedancia de Thevenin.

Según quedó establecido, el comportamiento de la red se puede resumir en la solución de:

$$[V] = [Z_{loop}][I_{\ell}]$$

Dado que como consecuencia de la aplicación del Teorema de Thevenin - los voltajes de la red son cero (se trata de una red pasiva) entonces:

$$0 = [Z_{loop}][I_{\ell}]$$

Puesto que son 7 mallas, Z_{loop} contiene los coeficientes de 7 ecuaciones independientes. Si el cálculo es para una falla a la vez, digamos en bus 1, necesariamente las corrientes en los elementos restantes - de reactancia cero son:

$$I_3 = I_6 = I_7 = 0$$

Entonces si conocemos 3 de las 7 incógnitas por determinar el sistema original se reduce a uno de 4 ecuaciones, la nueva matriz de coeficientes, si las combinaciones de 3, 6 y 7 desaparecen será: (elementos -- ashurados en la matriz Z_{loop} de la página)

$$
\begin{bmatrix}
Z_{11} & Z_{12} & Z_{14} & Z_{15} \\
Z_{21} & Z_{22} & Z_{24} & Z_{25} \\
Z_{41} & Z_{42} & Z_{44} & Z_{45} \\
Z_{51} & Z_{52} & Z_{54} & Z_{55}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = 0
$$

La corriente de la malla 1 es igual a la corriente del link 1 , el link 1 es de falla (Z = 0); la determinación de I_1 equivale a la determinación de la corriente total de falla, la determinación de I_2 I_3

e I_5 dará las contribuciones en los elementos 2, 3 y 5 (links reales del sistema)

Si calcamos de Z_{loop} la submatriz que contiene únicamente los elementos ashurados y hacemos I_1 = 1 °/1 (artificio) obtenemos:

$$\begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{24} & Z_{25} \\ Z_{42} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{52} & Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{21} & x & 1 \\ Z_{41} & x & 1 \\ Z_{51} & x & 1 \end{bmatrix}$$

o bien simplificando:

$$\begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{21} \\ Z_{41} \\ Z_{51} \end{bmatrix}$$

despejando: para falla en el nodo 1

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{21} \\ Z_{41} \\ Z_{51} \end{bmatrix}$$

NOTA:

para falla en el nodo 2 (asociada con el link 3)

$I_1 = I_6 = I_7 = 0 \qquad I_3 = 1$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{23} \\ Z_{43} \\ Z_{53} \end{bmatrix}$$

para falla en el nodo 3 (asociada con el link 7)

$I_1 = I_3 = I_6 = 0 \quad I_7 = 1$ °/1

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{27} \\ Z_{47} \\ Z_{57} \end{bmatrix}$$

para falla en el bus 4 (asociadas con el link 6)

$$I_1 = I_3 = I_7 = 0 \qquad I_6 = 1 \text{ pu}$$

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} Z_{26} \\ Z_{46} \\ Z_{56} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} Z_{LL} \end{bmatrix}^{-1}$ no cambia ya durante el proceso de cálculo o sea que la inversa de Z_{LL} sólo se calcula una vez.

Obtención del Inverso del Z LL

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 0.632 & 0.1250 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.1250 & 0.9125 & 0.1925 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.1925 & 0.4566 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0.1978 & 0 & 1.5823 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8878 & 0.1925 & -0.1978 & 1 & 0 \\ 0 & 0.1925 & 0.4566 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0.1978 & 0 & 1.5823 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2168 & -0.2228 & 1.1264 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4173 & 0.0429 & -0.2168 & 1 \end{array}\right]$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0.1978 & 0 & 1.5823 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2168 & -0.2228 & 1.1264 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1028 & -0.5195 & 2.3963 \end{array}\right]$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -0.0429 & 1.6264 & -0.2228 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2168 & -0.2228 & 1.1264 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1028 & -0.5195 & 2.3963 \end{array}\right]$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 1.6308 & -0.2451 & 0.1028 \\ 0 & 1 & 0 & -0.2451 & 1.2390 & -0.5195 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1028 & -0.5195 & 2.3963 \end{array}\right]$$

en nuestro caso:

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1.6308 & -0.2451 & 0.1028 \\ -0.2451 & 1.2390 & -0.5195 \\ 0.1028 & -0.5195 & 2.3963 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1250 \\ 0.1250 \\ 0. \end{bmatrix}$$

Llevando a cabo operaciones:

$$I_1 = 1$$

$$I_2 = -.2038 + .0306 = -.1732$$

$$I_4 = +.0306 - .1548 = -.1242$$

$$I_5 = -.01285 + .06493 = .05208$$

$$I_3 = 0$$

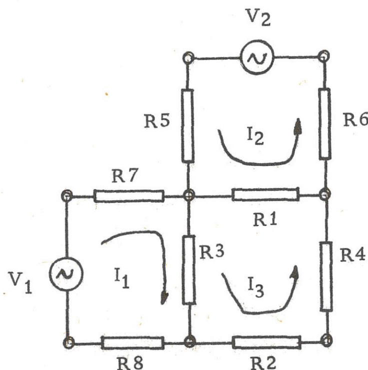
$$I_6 = 0$$

$$I_7 = 0$$

Cuando se inyecta en la malla una corriente $I_1 = 1$ pu, ésta se distribuye en la red en proporción a las reactancias de cada elemento. Los valores de I_2, I_4 e I_5 así obtenidos dan los factores de distribución, pero ni I_1 ni I_2, I_4 e I_5 son los valores reales de falla.

Si recurrimos a la siguiente explicación, entenderemos la filosofía del uso de este artificio que al final da directamente Z_{Th}

Para resolución de la malla de la figura formaríamos las siguientes ecuaciones:



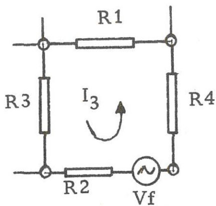
$$V_1 = I_1 R_7 + (I_1+I_3) R_3 + I_1 R_8$$

$$V_2 = I_2 R_5 + (I_2-I_3) R_1 + I_2 R_6$$

$$0 = I_3 (R_4+R_2) + (I_3+I_1) R_3 + (I_3-I_2) R_1$$

El tercer renglón es igual a cero por no existir fuentes de voltaje en la malla 3 .Si hacemos I_3 = 1 pu.,la ecuación ya no será igual a cero y se puede suponer que se ha agregado a la malla 3 un voltaje ficticio Vf que fuerza el valor de I_3

El tercer renglón queda:



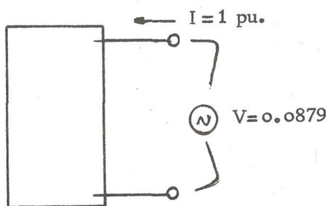
$$V_f = 1 \times R4 + 1 \times R2 + (I_1 + 1)\, R3 + (1 - I_2)\, R1$$

En nuestro caso,si substituimos los valores de I en el primer -- renglón de Z_{Loop} (primer renglón porque la falla es en el bus 1 -- asociado con el link 1) obtenemos:

$$I_1 \times Z_{11} + I_2 \times Z_{12} + I_4 \times Z_{13} + I_5 \times Z_{15} =$$

$$0.1250 \quad - 0.0216 \quad - 0.0155 \quad + 0.0 \quad = 0.0879$$

Por lo tanto:



Vth = 1 x Zth = 0.0879

Zth = 0.0879

$$FC = \frac{1}{0.0879} = 11.39 \text{ pu.}$$

I_2 = -.1732 x 11.39 = -1.97 pu

I_4 = -.1242 x 11.39 = -1.415 pu

I_5 = .05208 x 11.39 = 0.594 pu

Conocidas todas las corrientes en los links,mediante el producto $I_b = T_s^t I_\ell$ obtenemos las corrientes en los branches, resultados que se anotan enseguida:

VALORES DE CORTO CIRCUITO DIVISION TAMPICO

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS ASOCIADO CON FL 1 = 11.38813 EN PU

I 2	=	- 1.97239	EN PU
I 4	=	- 1.41574	EN PU
I 5	=	0.59687	EN PU
I 8	=	- 0.81887	EN PU
I 9	=	- 0.59687	EN PU
I 10	=	- 8.00001	EN PU
I 11	=	0.59687	EN PU

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS ASOCIADO CON FL 3 = 6.40612 EN PU

I 2	=	- 0.93462	EN PU
I 4	=	- 1.68067	EN PU
I 5	=	- 1.99222	EN PU
I 8	=	2.73323	EN PU
I 9	=	1.99222	EN PU
I 10	=	- 3.79083	EN PU
I 11	=	- 1.99222	EN PU

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS ASOCIADO CON FL 6 = 6.07238 EN PU

I 2 = - 0.96710 EN PU

I 4 = - 1.18273 EN PU

I 5 = 2.29135 EN PU

I 8 = 1.10862 EN PU

I 9 = 3.78102 EN PU

I 10 = - 3.92255 EN PU

I 11 = 2.29135 EN PU

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS ASOCIADO CON FL 7 = 6.09589 EN PU

I 2 = - 0.90511 EN PU

I 4 = - 1.51963 EN PU

I 5 = - 2.26309 EN PU

I 8 = 2.31317 EN PU

I 9 = 2.26309 EN PU

I 10 = - 3.67115 EN PU

I 11 = 3.83280 EN PU

APENDICE E.- Instructivo y listados de los programas HAWK01, HAWK02 HAWK03 y HAWK04 para el cálculo de fallas por el metodo de Z_{loop}

HAWK 01 DETERMINACION DE LINKS Y BRANCHES

Datos: 1).-Una tarjeta con NL y NB en Format (214) donde

NL= No. de elementos del sistema
NB= No. de Buses incluyendo el de referencia

2).-n tarjetas con FØRMAT (20F4.0) conteniendo la tabla No. 1 en forma corrida o sea:

elé #	ns	ne
1	1	1
2	1	4
3	1	5

Aparece en la tarjeta de la siguiente manera:

1. 1. 2. 2. 1. 4. 3. 1. 5. etc.

(Format (20F4.0)).

NOTA: Al final de los datos va una tarjeta en blanco y una con /*

Resultados: 1) Impresos

A). Los datos de entrada

a) No. de líneas y No. de Buses
b) Tabla de Elementos (Numerados)

B). La selección de links y ramas sin que en la malla se consideren links de falla ó ficticios

c) Tabla de links
d) Tabla de ramas

C). Las tablas de links y ramas considerando que en la red existen los links de falla.

e) Tabla de links incluyendo los de falla -- (Renumerados)

f) Tabla de branches de sistema (Renumerados)
g) No. de links incluyendo los de falla (KP1)
h) No. de branches de sistema (JP1)

2) En Tarjetas Perforadas

A). Las tablas e) y f) de Resultados impresos - en forma corrida
(Datos para HAWK 02)

HAWK 02 — FORMACION DE LA MATRIZ DE CONEXIONES O DE TRANSFORMACION.

Datos:

1) (KP1) No. de links incluyendo los de fallas

2) (JP1) No. de branches de sistema

3) (BN) No. de buses

(Estos 3 datos van en una tarjeta y con Format (2I4, F6.0) y son datos que imprime el HAWK 01 pero no perfora)

4) Tarjetas resultado de HAWK 01

NOTA: Al final de los datos póngase una tarjeta en blanco.

Resultados: 1) Impresos

A). Datos

a) KP1, JP1, BN
b) Links y Branches de Sistemas (Renumerados)

B). Resultados

c) Matriz C
d) Matriz C con Matriz I a su izquierda

##..

2) En Tarjetas Perforadas

A). Matriz C (Datos para HAWK 04 ó HAWK 05)

B). Matriz IC (Datos para HAWK 03)

HAWK 03 FORMACION DE LA MATRIZ Z LOOP

Datos:

1) Tarjeta con NL (No. de Elementos) y KP1 (No. de links incluyendo los de falla) en Format (2I4)

2) Matriz IC = Matriz T (De transformación) (salida de HAWK 02)

3) Diagonal de la Matriz de Impedancia, ("Z") o Primitiva que contiene las impedancias de los elementos de la red reales y ficticios (en Format - 10F8.4)

NOTA: Al final de los datos lleva una tarjeta en blanco.

Resultados: 1) Impresos

A). Datos

a) NL, KP1
b) Matriz transpuesta de IC (TT)

B). Resultados

c) Matriz Z'
(MZ' = MZ más Links de falla)
d) Matriz Z Loop
(Datos para HAWK 04)

HAWK 04 DETERMINACION DE LOS VALORES DE CORTO CIRCUITO EN CADA BUS MOSTRANDO LAS COLABORACIONES DE - CADA ELEMENTO.

Datos:

1) KP1, N. NL (Links incluyendo los de falla, Links de Sistema y elementos respectivamente) en una - tarjeta y Format (3I4)

##..

2) Lista de links de falla o ficticios (número que - les corresponde en las tablas) FØRMAT (2014).

3) Lista de links de Sistema ó reales (número que -- les corresponde en la lista) FØRMAT (2014)

4) Lectura de Z Loop tal como salió de HAWK 03

5) Matriz (TTS) salida de HAWK 02

NOTA: Al final de los datos lleva una tarjeta en blanco

Resultados: 1) <u>Impresos</u>

A). Datos

a) KP1, N, NL
b) LF (Links de Falla)
c) LS (Links de Sistema
d) Z Loop

B). Resultados

a) TTS (Submatriz de TT para obtener I de - Branch en función de I de Link
b) Valores de C.C. en P.U. por Bus mostran do las colaboraciones de cada elemento.

```
***************************************************************************************************************************************************

HH        HH   AAAAAAAAAA   WW        WW  KK        KK    00000000        11
HH        HH  AAAAAAAAAAAA  WW        WW  KK       KK    0000000000      111
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK      KK    00        00    1111
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK     KK     00        00      11
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK    KK      00        00      11
HHHHHHHHHHHH  AAAAAAAAAAAA  WW        WW  KKKKKKK       00        00      11
HHHHHHHHHHHH  AAAAAAAAAAAA  WW   WW   WW  KKKKKKK       00        00      11
HH        HH  AA        AA  WW  WWWW  WW  KK    KK      00        00      11
HH        HH  AA        AA  WW WW  WW WW  KK     KK     00        00      11
HH        HH  AA        AA  WWWW    WWWW  KK      KK    00        00      11
HH        HH  AA        AA  WWW      WWW  KK       KK    0000000000   1111111111
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK        KK    00000000    1111111111

                                          CCCCCCCCCC
                                         CCCCCCCCCCCC
                                         CC        CC
                                         CC
                                         CC
                                         CC
                                         CC
                                         CC
                                         CC
                                         CC        CC
                                         CCCCCCCCCCCC
                                          CCCCCCCCCC
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN              DATE = 75107          18/28/28              PAGE 0001

      C       FORMACION DE LA MATRIZ DE CONEXION C   T=(I,C)
              DIMENSION R(120),X(120),Y(120),XD(120),YD(120),XT(120),YT(120)
              DIMENSION DOS(120),TRES(120),YC(120)
            1 READ(5,200,END=319)   NL,NB
               IF(NL.EQ.0) GO TO 319
          200 FORMAT (2I4)
              WRITE(6,400) NL,NB
          400 FORMAT(T1,'1',T5,2I4)
              READ(5,201)(R(I),X(I),Y(I),I=1,NL)
          201 FORMAT(20F4.0)
      C       FORMACION DE LAS TABLAS 2,3 Y 4
              XT(1)=X(1)
              YT(1)=Y(1)
              I=1
              K=1
              M=1
              KON=1
            2 I=I+1
              J=1
              IF(X(I)-X(1)) 7,3,7
            3 IF(Y(I)-YT(J))5,4,5
            4 XD(K)=X(I)
              YD(K)=Y(I)
              K=K+1
              KON=KON+1
              GO TO 2
            5 J=J+1
              IF(J-M) 3,3,6
            6 XT(J)=X(I)
              YT(J)=Y(I)
              M=M+1
              KON=KON+1
              GO TO 2
            7 J=1
              L=1
           41 YC(L)=YT(J)
              L=L+1
              J=J+1
              IF(J-M) 41,41,8
            8 N=1
              IM=I
              J=M+1
              MM=M+1
            9 L=N
           10 IF(YC(L)-X(I)) 11,14,11
           11 IF(YC(L)-Y(I)) 16,12,16
           12 VAR=X(I)
           13 GO TO 17
```

```
   14 VAR=Y(I)
   15 GO TO 17
   16 I=I+1
      IF(I-(NL+1)) 16,21,21
   17 L=N
   18 L=L+1
      IF(L-MM) 19,22,19
   19 IF(VAR-YC(L)) 18,20,18
   20 XD(K)=X(I)
      YD(K)=Y(I)
      K=K+1
      KON=KON+1
      I=I+1
      GO TO 30
   21 N=N+1
      I=IM
      GO TO 30
   22 L=N
   23 L=L-1
      IF(L) 27,27,24
   24 IF(VAR-YC(L)) 23,26,23
   25 GO TO 30
   26 I= I+1
      GO TO 30
   27 L=MM
   28 YC(L)=VAR
      XT(J)=X(I)
      YT(J)=Y(I)
      J=J+1
      KON=KON+1
      I=I+1
      MM=MM+1
      M=M+1
      IF(I-(NL+1)) 30,29,30
   29 N=N+1
      I=IM
   30 IF(KON-NL) 9,31,9
   31 I=1
      DOS(I)=1.0
   33 DOS(I+1)=DOS(I)+1.0
      I=I+1
      IF(I-(K-1)) 33,34,34
   34 I=1
      TRES(I)=K
   36 TRES(I+1)=TRES(I)+1.0
      I=I+1
      IF(I-M) 36,40,40
   40 JP1=J-1
```

```
      KP1=K-1
      WRITE(6,213) KP1
      WRITE(6,214) JP1
      IF(KP1-JP1) 305,303,300
  213 FORMAT(T1,'1',T15,'NUMERO DE LINKS = ',T33,I3/)
  214 FORMAT(T1,' ',T12,'NUMERO DE BRANCHES = ',T33,I3////)
  300 WRITE(6,202)(R(I),X(I),Y(I),DOS(I),XD(I),YD(I),TRES(I),XT(I),YT(I)
     1,I=1,JP1)
  202 FORMAT(T1,' ',T10,3F4.0,F6.0,2F4.0,F6.0,2F4.0)
  301 WRITE(6,203)(R(I),X(I),Y(I),DOS(I),XD(I),YD(I),I=J,KP1)
  203 FORMAT(T1,' ',T10,3F4.0,F6.0,2F4.0)
  302 WRITE(6,204)(R(I),X(I),Y(I),I=K,NL)
  204 FORMAT(T1,' ',T10,3F4.0)
      GO TO 310
  303 WRITE(6,202)(R(I),X(I),Y(I),DOS(I),XD(I),YD(I),TRES(I),XT(I),YT(I)
     1,I=1,JP1)
      GOTO 310
  305 WRITE(6,202)(R(I),X(I),Y(I),DOS(I),XD(I),YD(I),TRES(I),XT(I),YT(I)
     1,I=1,KP1)
  306 WRITE(6,205)(R(I),X(I),Y(I),TRES(I),XT(I),YT(I),I=K,JP1)
  205 FORMAT(T1,' ',T10,3F4.0,F20.0,2F4.0)
  307 WRITE(6,204)(R(I),X(I),Y(I),I=J,NL)
  310 DO 312 I=1,KP1
      K9=(NB-1)+I
      XD(K9)=XD(I)
      YD(K9)=YD(I)
  312 DOS(K9)=DOS(I)
      K6=NB-1
      DO 320 I=1,K6
      XD(I)=0.0
      YD(I)=0.0
  320 DOS(I)=0.0
      DO 321 I=1,K6
      HI=I
      XD(I)=HI
      DOS(I)=HI
  321 YD(I)=NB
      K5=NB+(KP1-1)
      DO 322 I=NB,K5
  322 DOS(I)=I
      K4=NB+KP1
      DO 323 I=1,JP1
  323 TRES(I)=(K4-1)+I
      WRITE(6,209)
  209 FORMAT(T1,'1')
  315 WRITE(6,208)(DOS(I),XD(I),YD(I),TRES(I),XT(I),YT(I),I=1,JP1)
  208 FORMAT(T1,' ',T10,3F4.0,F6.0,2F4.0)
      JP2=JP1+1
```

```
          KP2=KP1+(NB-1).
      316 WRITE(6,204) (DOS(I),XD(I),YD(I),I=JP2,KP2)
          WRITE(6,213) KP2
          WRITE(6,214) JP1
      317 WRITE(7,201)(DOS(I),XD(I),YD(I),I=1,KP2)
      318 WRITE(7,201)(TRES(I),XT(I),YT(I),I=1,JP1)
          GO TO 1
      319 WRITE(6,330)
      330 FORMAT(T1,'1')
      331 STOP
          END
```

E-10

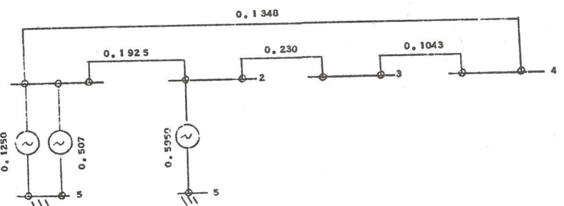
NUMERO CE LINKS = 3

NUMERO CE BRANCHES = 4

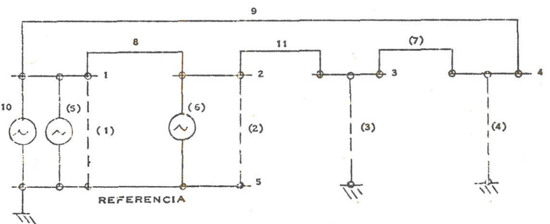
1.	1.	2.
2.	1.	4.
3.	1.	5.
4.	1.	5.
5.	2.	3.
6.	2.	5.
7.	3.	4.

1.	1.	5.
2.	2.	5.
3.	3.	4.

4.	1.	2.
5.	1.	4.
6.	1.	5.
7.	2.	3.



1.	1.	5.	8.	1.	2.
2.	2.	5.	9.	1.	4.
3.	3.	5.	10.	1.	5.
4.	4.	5.	11.	2.	3.
5.	1.	5.			
6.	2.	5.			
7.	3.	4.			



NUMERO DE LINKS = 7

NUMERO DE BRANCHES = 4

HAWKO2

A

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN              DATE = 75106        20/29/50            PAGE 0001

          DIMENSION DOS(94),XD(94),YD(94),TRES(54),XT(54),YT(54),XSE(54)
          DIMENSION TL6(54,94),XSI(54),TB7(54,94),GAMA(80),RAMA(80),T8(80)
          DIMENSION AT(54,148)
      290 FORMAT(2I4,F6.0)
      291 FORMAT(20F4.0)
      207 FORMAT(' ',2X,32F4.0)
      208 FORMAT(T1,'1',T10,'EXISTE ERROR')
      601 FORMAT(1H0,26HDIMENSION TL6 INSUFICIENTE)
      701 FORMAT(1H0,35HEXISTE ERROR 1 EN DIMENSION DE RAMA)
      801 FORMAT(1H0,35HEXISTE ERROR 2 EN DIMENSION DE RAMA)
      215 FORMAT(//T1,'1',T5,'MATRIZ      ( C )'//)
       10 READ(5,290,END=122) KP1,JP1,BN
           IF(KP1.EQ.0) GO TO 122
          WRITE(6,390) KP1,JP1,BN
      390 FORMAT(T1,'1',T5,2I4,F6.0)
          READ(5,291) (DOS(I),XD(I),YD(I),I=1,KP1)
          WRITE(6,391)(DOS(I),XD(I),YD(I),I=1,KP1)
          READ(5,291) (TRES(I),XT(I),YT(I),I=1,JP1)
          WRITE(6,391)(TRES(I),XT(I),YT(I),I=1,JP1)
      391 FORMAT(/T1,' ',T5,20F4.0)
C         FORMACION DE TABLA 6
C         FORMACION DE LA MATRIZ DE CONEXION C T=(I,C)
       45 I=1
          XSE(I)=2.
       46 J=1
          KN=1
       47 IF(XD(KN)-XSE(I)) 48,51,48
       48 IF(YD(KN)-XSE(I)) 49,52,49
       49 KN=KN+1
       50 IF(KN-KP1) 47,47,54
       51 TL6(I,J)=DOS(KN)
          J=J+1
          GO TO 49
       52 TL6(I,J)= -DOS(KN)
          J=J+1
          GO TO 49
       54 TL6(I,J)=0.
          I=I+1
          XSE(I)=XSE(I-1)+1.
C         BN=NUMERO DE BUSES (NODOS)
          IF(XSE(I)-BN) 46,46,58
C         FORMACION DE TABLA 7
       58 I=1
          XSI(I)=2.
       59 J=1
          KN=1
       60 IF(XT(KN)-XSI(I)) 61,65,61
       61 IF(YT(KN)-XSI(I)) 62,66,62
```

```
   62 KN=KN+1
   64 IF(KN-JP1) 60,60,67
   65 TB7(I,J)=TRES(KN)
      J=J+1
      GO TO 62
   66 TB7(I,J)= -TRES(KN)
      J=J+1
      GC TO 62
   67 TB7(I,J)= 0.0
      I=I+1
      XSI(I)=XSI(I-1)+1.
      IF(XSI(I)-BN) 59,59,68
C     FORMACION DE LA RAMA (EJ -9,-13,16)
   68 KL=1
   69 I=1
      L=1
      N=1
      J=1
      PV=0.0
      NB=BN
      GAMA(N)=TRES(KL)
   70 IF(GAMA(N)-ABS(TB7(I,J))) 71,72,71
   71 I=I+1
      IF(I-NB) 70,8C,8C
   72 IF(PV) 75,73,75
   73 PV=1.
   74 RAMA(L)=TB7(I,J)
   75 J=J+1
   76 IF(TB7(I,J)) 77,78,77
   77 L=L+1
      GO TO 74
   78 I=I+1
      J=1
      IF(I-NB) 70,8C,80
   80 N=N+1
      I=1
      J=1
      IF(N-L) 81,81,82
   81 GAMA(N) =ABS(RAMA(N))
      GO TO 70
C     NODOS ASOCIADOS CON LA RAMA
   82 N=1
      J=1
      I=1
   83 IF(GAMA(N)-TRES(J)) 84,85,84
   84 J=J+1
      GO TO 83
   85 T8(I)=XT(J)
```

```
0091            T8(I+1)=YT(J)
0092            I=I+2
0093            J=J+1
0094            N=N+1
0095         86 IF(N-L) 83,83,87
0096         87 T8(I)=0.0
0097            IA=I-1
0098            I=2
0099            L=1
0100            KI=3
0101            IF(IA-I) 150,150,88
0102         88 IF(RAMA(L)) 90,700,89
0103        700 WRITE(6,701)
0104         89 PCS=-1.
0105            T8(I)=T8(I-1)
0106            GO TO 91
0107         90 PCS=1.
0108         91 IF(T8(I)-T8(KI)) 93,92,93
0109         92 T8(KI)=0.0
0110         93 KI=KI+1
0111            IF(KI-IA) 91,91,94
0112         94 I=I+1
0113            IF(I-IA) 95,97,95
0114         95 IF(T8(I)) 96,94,96
0115         96 KI=I+1
0116            GO TO 91
0117        150 IF(RAMA(L)) 152,800,151
0118        800 WRITE(6,801)
0119        151 POS=-1.
0120            T8(I)=T8(I-1)
0121            GO TO 97
0122        152 POS=1.
0123            GO TO 97
          C     CEROS EN LAS COLUMNAS DE LA MATRIZ T
0124         97 I=2
0125            I6=1
0126            KN=1
0127         98 AT(KN,KL)=0.
0128            KN =KN+1
0129            IF(KN-(KP1+1)) 98,99,98
0130         99 IF(T8(I)) 100,110,100
0131        100 IF(T8(I)-XSE(I6)) 101,102,101
0132        101 I6=I6+1
0133            GO TO 100
          C     FORMACION DE LAS COLUMNAS
0134        102 J=1
0135            KN=1
0136        103 IF(TL6(I6,J)) 104,110,104
```

```
104 IF(KN - ABS(TL6(I6,J))) 105,106,105
105 KN=KN+1
    IF(KN-(KP1+1)) 104,500,104
106 IF(TL6(I6,J)) 107,600,108
600 WRITE(6,601)
500 WRITE(6,208)
    GO TO 122
107 IF(AT(KN,KL)) 201,200,201
200 AT(KN,KL)=-POS
    GO TO 109
201 AT(KN,KL)=0.0
    GO TO 109
108 IF(AT(KN,KL)) 201,202,201
202 AT(KN,KL)=POS
109 J=J+1
    IF(TL6(I6,J)) 105,110,105
110 I=I+1
    IF(I-IA) 111,111,113
111 I6=1
    GO TO 99
113 KL =KL+1
    IF(KL-(JP1+1)) 69,120,69
120 WRITE(6,215)
    DO 330 KN=1,KP1
330 WRITE(6,207)(AT(KN,KL),KL=1,JP1)
    WRITE(7,291)((AT(KN,KL),KL=1,JP1),KN=1,KP1)
    KN=1
114 KL=1
115 KA=KP1+KL
    AT(KN,KA)=AT(KN,KL)
    KL=KL+1
    IF(KL-JP1)115,115,117
117 KN=KN+1
    IF(KN-KP1)114,114,119
119 DO 301 KN=1,KP1
    DO 301 KL=1,KP1
    IF(KN-KL)304,305,304
305 AT(KN,KL)=1.0
    GO TO 310
304 AT(KN,KL)=0.0
310 CONTINUE
301 CONTINUE
    KP2=KP1+JP1
    WRITE(6,228)
228 FORMAT(//T1,'1',T5,'MATRIZ (C), CON MATRIZ IDENTIDAD A SU IZQUIERD
   1A'//)
    WRITE(6,207)((AT(KN,KL),KL=1,KP2),KN=1,KP1)
    WRITE(7,291)((AT(KN,KL),KL=1,KP2),KN=1,KP1)
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN            DATE = 75106          20/29/50            PAGE 0005

                  GO TO 10
              122 WRITE(6,203)
              203 FORMAT(T1,'1')
              123 STOP
                  END
```

7 4 5.

1. 1. 5. 2. 2. 5. 3. 3. 5. 4. 4. 5. 5. 1. 5. 6. 2. 5. 7. 3.

4.

8. 1. 2. 9. 1. 4. 10. 1. 5. 11. 2. 3.

MATRIZ (C)

0.	0.	-1.	0.
1.	0.	-1.	0.
1.	0.	-1.	1.
0.	1.	-1.	0.
0.	0.	-1.	0.
1.	0.	-1.	0.
1.	-1.	0.	1.

E-21

MATRIZ (C), CON MATRIZ IDENTIDAD A SU IZQUIERDA

```
1.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0. -1.  0.| 0.  1.  0.  0.  0.  0.  0.  1.  0. -1.  0.| 0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.  1.  0. -1
1.| 0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.  1. -1.  0.| 0.  0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0. -1.  0.| 0.  0.  0.  0.  0.  1.  0.  1.  0
-1.  0.| 0.  0.  0.  0.  0.  0.  1.  1. -1.  0.  1.|
```

1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	-1	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	-1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	-1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	1

E-22

HAWK03

A

```
FORTRAN IV G LEVEL  21              MAIN              DATE = 75106          20/46/29              PAGE 0001

      C     FORMACION DE LA MATRIZ Z LOOP
            DIMENSION T(15,30),Z(30,30),C(15,30),TT(30,15),ZBUS(20,20)
          5 READ(5,100,END=10) NL,KP1
             IF(NL.EQ.0) GO TO 10
        100 FORMAT(2I4)
        101 FORMAT(20F4.0)
        102 FORMAT(10F8.4)
            WRITE(6,105) NL,KP1
            READ(5,101)((T(I,J),J=1,NL),I=1,KP1)
        105 FORMAT(////T1,'1',T10,2I4)
            WRITE(6,106)((T(I,J),J=1,NL),I=1,KP1)
        106 FORMAT(T1,' ',T10,20F4.0)
            DO 15 I=1,NL
            DO 16 J=1,NL
            Z(I,J)=0.
         16 CONTINUE
         15 CONTINUE
            READ(5,102)(Z(I,I),I=1,NL)
            WRITE(6,107)((Z(I,J),J=1,NL),I=1,NL)
        107 FORMAT(T1,' ',T10,10F8.4)
          4 DO 20 J=1,NL
            DO 20 I=1,KP1
            C(I,J)=0.0
            DO 20 K=1,NL
         20 C(I,J)=C(I,J)+T(I,K)*Z(K,J)
            DO 40 I=1,NL
            DO 40 J=1,KP1
         40 TT(I,J)=T(J,I)
         23 DO 30 J=1,KP1
            DO 30 I=1,KP1
            ZBUS(I,J)=0.0
            DO 30 K=1,NL
         30 ZBUS(I,J)=ZBUS(I,J)+C(I,K)*TT(K,J)
            WRITE(6,103)
        103 FORMAT(////T1,'1',T15,'MATRIZ Z LOOP'////)
            WRITE(6,104)((ZBUS(I,J),J=1,KP1),I=1,KP1)
        104 FORMAT(' ',2X,10F8.4)
            WRITE (7,102)((ZBUS(I,J),J=1,KP1),I=1,KP1)
            GO TO 5
         10 WRITE(6,11)
         11 FORMAT(T1,'1')
         12 STOP
            END
```

E-24

```
11    7
1.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0. -1.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.  0.  1.  0.
-1. 0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0.  1.  0. -1.  1.  0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.
0.  1. -1.  0.  0.  0.  0.  0.  1.  0.  0.  0.  0. -1.  0.  0.  0.  0.  0.  0.
1.  0.  1.  0. -1.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  0.  1.  1. -1.  0.  1.
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0507    0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.5950    0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.1043    0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.1925    0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.1348    0.0       0.0       0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.1250    0.0
0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
0.0250
```

MATRIZ Z LOOP

0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.0	0.1250	0.3175	0.3175
0.1250	0.1250	0.3175	0.1925	0.1250	0.3175	0.3425	0.1250	0.1250	0.3175
0.2175	0.1250	0.1250	0.1250	0.2598	0.1250	0.1250	0.1348	0.1250	0.1250
0.1250	0.1250	0.1757	0.1250	0.0	0.1250	0.3175	0.3175	0.1250	0.1250
0.9125	0.1925	0.0	0.1925	0.2175	-0.1348	0.0	0.1925	0.4566	

RESULTADO DEL PROGRAMA HAWK03

0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.0
0.1250	0.3175	0.3175	0.1250	0.1250	0.3175	0.1925
0.1250	0.3175	0.3425	0.1250	0.1250	0.3175	0.2175
0.1250	0.1250	0.1250	0.2598	0.1250	0.1250	-0.1348
0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1757	0.1250	0.0
0.1250	0.3175	0.3175	0.1250	0.1250	0.9125	0.1925
0.0	0.1925	0.2175	-0.1348	0.0	0.1925	0.4566

RESULTADO DE LAS NOTAS

E-26

```
************************************************************************************************

HH        HH   AAAAAAAAAA   WW        WW  KK        KK   00000000        444
HH        HH  AAAAAAAAAAAA  WW        WW  KK       KK   0000000000      4444
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK      KK   00        00    44 44
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK     KK    00        00   44  44
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK    KK     00        00  44   44
HHHHHHHHHHHH  AAAAAAAAAAAA  WW        WW  KKKKKKK      00        00 44444444444
HHHHHHHHHHHH  AAAAAAAAAAAA  WW   WW   WW  KKKKKKK      00        00 44444444444
HH        HH  AA        AA  WW  WWWW  WW  KK    KK     00        00       44
HH        HH  AA        AA  WW WW  WW WW  KK     KK    00        00       44
HH        HH  AA        AA  WWWW    WWWW  KK      KK   00        00       44
HH        HH  AA        AA  WWW      WWW  KK       KK   0000000000        44
HH        HH  AA        AA  WW        WW  KK        KK   00000000         44

                                   AAAAAAAAAA
                                  AAAAAAAAAAAA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
                                  AAAAAAAAAAAA
                                  AAAAAAAAAAAA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
                                  AA        AA
```

FORTRAN IV G LEVEL 21 MAIN DATE = 74106 03/41/32 PAGE 0001

```
      COMMON ZLL(24,24),ZLLI(24,24),IPIVOT(24),INDEA(24,10),PIVOT(24),
     1ZIL(65,65),ADF(88,45),ZBUS(64,64),LF(41),LS(24),TTS(65,45)
   10 JJ=0
      READ(5,1000,END=930) KP1,N,NL
 1000 FORMAT(3I4)
       IF(KP1.EQ.0) GO TO 930
      WRITE(6,1010)KP1,N,NL
 1010 FORMAT(//T1,'1',T5,3I4)
      NN=KP1-N
      READ(5,1001)(LF(I),I=1,NN)
 1001 FORMAT(20I4)
      WRITE(6,1011)(LF(I),I=1,NN)
 1011 FORMAT(T1,' ',T5,20I4)
      READ(5,1001)(LS(I),I=1,N)
      WRITE(6,1011)(LS(I),I=1,N)
      READ(5,1003)((ZBUS(I,J),J=1,KP1),I=1,KP1)
 1003 FORMAT(10F8.4)
      WRITE(6,1013)((ZBUS(I,J),J=1,KP1),I=1,KP1)
 1013 FORMAT(T1,' ',T5,10F8.4)
      MM=NL-KP1
      READ(5,1004)((TTS(I,J),J=1,MM),I=1,KP1)
 1004 FORMAT(20F4.0)
      WRITE(6,1014)((TTS(I,J),J=1,MM),I=1,KP1)
 1014 FORMAT(//T1,' ',T5,20F4.0)
      I=1
      J=1
    2 K=LS(I)
      L=LS(J)
      ZLL(I,J)=ZBUS(K,L)
      J=J+1
      IF(N-J) 3,2,2
    3 I=I+1
      IF(N-I) 5,4,4
    4 J=1
      GO TO 2
    5 WRITE(6,1020)
 1020 FORMAT(T1,'1',T5,'VALORES DE CORTO CIRCUITO',
     1/)
      CALL RAPH(N)
      KON=1
  800 J=KON
      DO 801 I=1,N
      K=LS(I)
      L=LF(KON)
  801 ZIL(I,J)=ZBUS(K,L)
      CALL PMMO(N,KON,KP1)
      MO=LF(KON)
      CALL PMM1(MO,KP1,KON,FC)
```

```
      DO 807 I=1,KP1
  807 ADF(I,J)=FC*ADF(I,J)
      K=LF(KCN)
      IF(JJ) 920,808,806
  806 WRITE(6,1006)
 1006 FORMAT(T1,'1')
  808 WRITE(6,1005) LF(KCN),ADF(K,J)
 1005 FORMAT(T1,' ',T14,'VALOR DE LA FALLA EN EL BUS NUMERO',
     1T50,I3,T54,'=',T56,F10.5,T69,'EN PU'/)
      COSX1=2./ADF(K,J)
      WRITE(7,1100)COSX1
 1100 FORMAT(F10.5)
      JJ=JJ+1
      CALL PMM2(KP1,MM,KCN)
      HMM=MM
      HNL=NL
      II=(NL-MM)/2
      AII=II
      AIII=(HNL-HMM)/2.
      DO 609 I=1,II
      K=MM+I
      III=MM+I+II
      WRITE(6,1007) K,ADF(K,J),III,ADF(III,J)
 1007 FORMAT(T1,'0',T13,'I',T15,I3,T19,'=',T22,F10.5,T34,'EN PU'
     1T63,'I',T65,I3,T69,'=',T72,F10.5,T84,'EN PU')
       IF(K.EQ.70) WRITE(6,1006)
  609 CONTINUE
      IF(AIII-AII)918,918,919
  919 WRITE(6,1008) NL,ADF(NL,J)
 1008 FORMAT(T1,'0',T63,'I',T65,I3,T69,'=',T72,F10.5,T84,'EN PU')
  918 KCN=KCN+1
      IF(NN-KON) 920,800,800
  920 GO TO 10
  930 WRITE(6,999)
  999 FORMAT(T1,'1')
       STOP
      END
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN                DATE = 74106          03/41/32                PAGE 0001

      C      PRIMEPA SUBRUTINA RAPH(N)
             SUBROUTINE RAPH(N)
             COMMON   A(24,24),AINV(24,24),IPIVOT(24),INDEA(24,10),PIVOT(24),
            1ZIL(65,65),ADF(88,45),ZBUS(64,64),LF(41),LS(24),TTS(65,45)
          10 DETERM=1.0
          15 DO 20 J=1,N
          20 IPIVOT(J)=0
          30 DO 550 I=1,N
          40 AMAX=0.0
          45 DO 105 J=1,N
          50 IF(IPIVOT(J)-1) 60,105,60
          60 DO 100 K=1,N
          70 IF(IPIVOT(K)-1) 80,100,100
          80 IF(ABS(AMAX)-ABS(A(J,K))) 85,100,100
          85 IROW=J
          90 ICOLUM=K
          95 AMAX=A(J,K)
         100 CONTINUE
         105 CONTINUE
         110 IPIVOT(ICOLUM)=IPIVOT(ICOLUM)+1
         130 IF(IROW-ICOLUM) 140,260,140
         140 DETERM=-DETERM
         150 DO 200 L=1,N
         160 SWAP= A(IROW,L)
         170 A(IROW,L)=A(ICOLUM,L)
         200 A(ICOLUM,L)=SWAP
         260 INDEA(I,1)=IROW
         270 INDEA(I,2)=ICOLUM
         310 PIVOT(I)=A(ICOLUM,ICOLUM)
         320 DETERM=DETERM*PIVOT(I)
         330 A(ICOLUM,ICOLUM)=1.0
         340 DO 350 L=1,N
         350 A(ICOLUM,L)=A(ICOLUM,L)/PIVOT(I)
         380 DO 550 L1=1,N
         390 IF(L1-ICOLUM) 400,550,400
         400 T=A(L1,ICOLUM)
         420 A(L1,ICOLUM)=0.0
         430 DO 450 L=1,N
         450 A(L1,L) = A(L1,L)-A(ICOLUM,L)*T
         550 CONTINUE
         600 DO 710 I=1,N
         610 L=N+1-I
         620 IF(INDEA(L,1)-INDEA(L,2)) 630,710,630
         630 JROW=INDEA(L,1)
         640 JCOLUM=INDEA(L,2)
         650 DO 705 K=1,N
         660 SWAP=A(K,JROW)
         670 A(K,JROW)=A(K,JCOLUM)
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                    RAPH                DATE = 74106          03/41/32             PAGE 0002

          700 A(K,JCOLUM)=SWAP
          705 CONTINUE
          710 CONTINUE
              DO 740 J=1,N
              DO 740 I=1,N
          740 AINV(I,J)=-1.*A(I,J)
              RETURN
              END
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN              DATE = 74106          03/41/32              PAGE 0001

                C       SEGUNDA SUBRUTINA PMMO(N,KCN,KP1)
 0001                   SUBROUTINE PMMO(N,KCN,KP1)
 0002                   COMMON ZLL(24,24),    A(24,24),IPIVOT(24),INDEA(24,10),PIVOT(24),
                      1  B(65,65),  C(88,45),ZBUS(64,64),LF(41),LS(24),TTS(65,45)
 0003                   M=KCN
 0004                   DO 890 I=1,KP1
 0005              890  C(I,M)=0.0
 0006                   DO 891 I=1,N
 0007                   K=LS(I)
 0008                   DO 891 KM=1,N
 0009              891  C(K,M)=C(K,M)+A(I,KM)*B(KM,M)
 0010                   IK=LF(KCN)
 0011                   C(IK,M)=1.0
 0012                   RETURN
 0013                   END
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21                MAIN              DATE = 74106         03/41/32              PAGE 0001

      C      TERCERA SUBRUTINA PMM1(KO,K1,K2,CF)
             SUBROUTINE PMM1(KO,K1,K2,CF)
             COMMON ZLL(24,24),ZLLI(24,24),IPIVOT(24),INDEA(24,10),PIVOT(24),
            1ZIL(65,65),  B(88,45),   A(64,64),LF(41),LS(24),TTS(65,45)
             I=KO
             M=KO
             J=K2
             CFI=0.0
             DO 901 K=1,K1
         901 CFI=CFI+A(M,K)*B(K,J)
             CF=1.0/CFI
             RETURN
             END
```

```
FORTRAN IV G LEVEL  21            MAIN            DATE = 74106          03/41/32            PAGE 0001

            C      CUARTA SUBRUTINA PMM2(KP1,MM,KON)
 0001              SUBROUTINE PMM2(KP1,MM,KCN)
 0002              COMMON ZLL(24,24),ZLLI(24,24),IPIVOT(24),INDEA(24,10),PIVOT(24),
                  1ZIL(65,65),ADF(88,45),ZBUS(64,64),LF(41),LS(24),TTS(65,45)
 0003              J=KCN
 0004              DO 820 I=1,MM
 0005              II=KP1+I
 0006              ADF(II,J)=0.0
 0007              DO 820 K= 1,KP1
 0008          820 ADF(II,J)=ADF(II,J)+TTS(K,I)*ADF(K,J)
 0009              RETURN
 0010              END
```

```
7      3      11
1      2      3      4
5      6      7
0.1250 0.1250 0.1250 0.1250 0.1250 0.1250 0.0     0.1250 0.3175 0.3175
0.1250 0.1250 0.3175 0.1925 0.1250 0.3175 0.3425  0.1250 0.1250 0.3175
0.2175 0.1250 0.1250 0.1250 0.2598 0.1250 0.1250 -0.1348 0.1250 0.1250
0.1250 0.1250 0.1757 0.1250 0.0    0.1250 0.3175  0.3175 0.1250 0.1250
0.9125 0.1925 0.0    0.1925 0.2175 -0.1348 0.0    0.1925 0.4566

0.  0. -1.  0.  1.  0. -1.  0.  1.  0. -1.  1.  0.  1. -1.  0.  0.  0. -1.  0.

1.  0. -1.  0.  1. -1.  0.  1.
```

```
VALORES DE CORTO CIRCUITO

     VALOR DE LA FALLA EN EL BUS NUMERO    1 =   29.13959   EN PU

     I   5 =   -19.72385  EN PU                        I   8 =   -0.81887  EN PU
     I   6 =    -1.41574  EN PU                        I   9 =   -0.59687  EN PU
     I   7 =     0.59687  EN PU                        I  10 =   -8.00000  EN PU
                                                       I  11 =    0.59687  EN PU
```

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS NUMERO 2 = 8.46432 EN PU

I 5 =	-4.82616 EN PU	I 8 =	3.92371 EN PU
I 6 =	-1.68067 EN PU	I 9 =	2.85995 EN PU
I 7 =	-2.85995 EN PU	I 10 =	-1.95749 EN PU
		I 11 =	-2.85995 EN PU

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS NUMERO 3 = 8.01729 EN PU

I 5 =	-4.65225 EN PU	I 8 =	3.34335 EN PU
I 6 =	-1.47809 EN PU	I 9 =	3.19586 EN PU
I 7 =	-3.19586 EN PU	I 10 =	-1.88695 EN PU
		I 11 =	4.82144 EN PU

VALOR DE LA FALLA EN EL BUS NUMERO 4 = 8.37181 EN PU

I 5 =	-5.21074	EN PU		I 8 =	1.86564	EN PU
I 6 =	-1.04759	EN PU		I 9 =	5.45858	EN PU
I 7 =	2.91323	EN PU		I 10 =	-2.11347	EN PU
				I 11 =	2.91323	EN PU

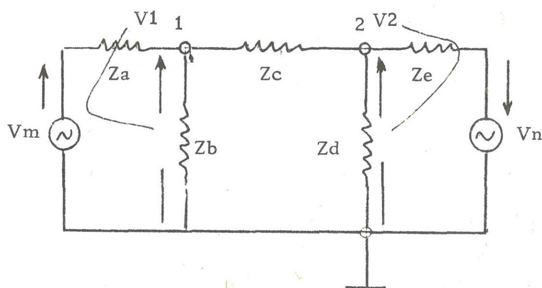
10.- ANALISIS POR EL METODO DE NODOS.

10.- ANALISIS POR EL METODO DE NODOS.

Antecedentes.

El análisis por nodos consiste en la aplicación de la ley de Kirchhoff para corrientes; la suma de corrientes en un nodo es cero.

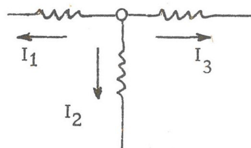
Un nodo es un punto de la malla donde se conectan dos o más elementos y los voltajes en cada nodo se miden con respecto a uno llamado de referencia. Con objeto de establecer tácitas las convenciones, analicemos la red elemental dibujada enseguida: Por ejemplo, V_{12} es el voltaje entre los nodos 1 y 2. $V_{12} = V_1 - V_2$. V_1 , V_2 se miden con respecto a la referencia en ese orden.



para el nodo 1, si consideramos que las tres corrientes salen del nodo la suma será cero. O sea:

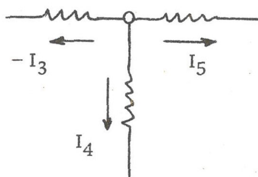
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$\frac{V_1 - V_m}{Z_a} + \frac{V_1}{Z_b} + \frac{V_1 - V_2}{Z_c} = 0$$



de manera similar para el nodo 2

$$\frac{V_2 - V_1}{Z_c} + \frac{V_2}{Z_d} + \frac{V_2 + V_n}{Z_e} = 0$$



Ordenando términos en 1 y 2 obtenemos:

$$\left(\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c}\right)V_1 - \frac{1}{Z_c}V_2 = \frac{1}{Z_a}V_m$$

$$-\frac{1}{Z_c}V_1 + \left(\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e}\right)V_2 = -\frac{1}{Z_e}V_n$$

Dado que $1/Z = Y$ podemos escribir:

$$(Y_a + Y_b + Y_c)V_1 - Y_cV_2 = Y_aV_m$$

$$-Y_cV_1 + (Y_c + Y_d + Y_e)V_2 = -Y_eV_n$$

Las conclusiones interesantes serán las siguientes:

1.- El número de ecuaciones es igual a número de nodos menos 1.

2.- El término $(1/Z_a)V_m$ es positivo y corresponde a una inyección de corriente en el nodo.

El término $(1/Z_e)V_n$ es negativo y corresponde a una extracción de corriente del nodo.

3.- La solución se puede generalizar y condensar de la siguiente manera:

$$Y_{11}V_1 - Y_{12}V_2 = I_1$$

$$-Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 = I_2$$

Y_{11} es la admitancia propia del nodo 1 y es la suma de todas las admitancias que inciden en ese nodo.

Y_{12} es la admitancia "mutua" entre 1 y 2 y es la suma de las admitancias que conectan directamente 1 y 2.

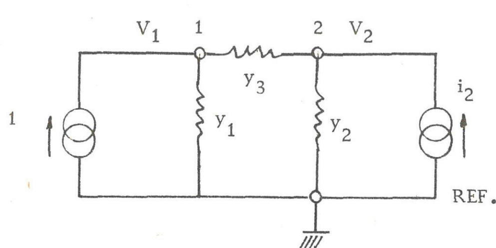
Y_{22} es la admitancia propia del nodo 2 y es la suma de las admitancias que inciden en ese nodo.

Y_{21} es la admitancia mutua entre 2 y 1 y es la suma de las admitancias que conectan directamente los nodos 2 y 1

4.- Todas las admitancias propias tienen signo positivo. Todas las admitancias mutuas tienen signo negativo.

5.- La matriz es simétrica.

Buscando ya una orientación hacia la solución del problema que nos interesa, podemos asociar a la red de la Fig.   las siguientes ecuaciones:



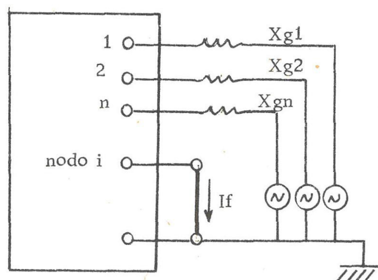
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_3 & -Y_3 \\ -Y_3 & Y_2 + Y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

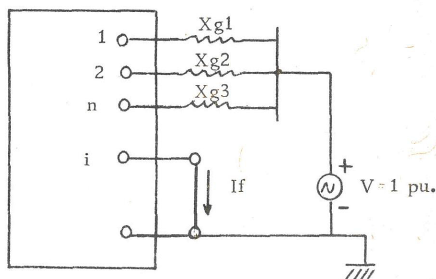
Generalizando: $\left[I \right] = \left[Y\ bus \right] \left[V \right]$

multiplicando por $\left[Y\ bus \right]^{-1}$ ambos términos de la ecuación

$$\left[V \right] = \left[Y\ bus \right]^{-1} \left[I \right] = \left[Zbus \right] \left[I \right]$$

El problema se plantea para falla en el nodo i de la siguiente manera:





entonces las ecuaciones asociadas serán:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ v_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \cdots\cdots Z_{1i} \cdots\cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} \cdots\cdots Z_{2i} \cdots\cdots & Z_{2n} \\ & & \\ Z_{i1} & Z_{i2} \cdots\cdots Z_{ii} \cdots\cdots & Z_{in} \\ & & \\ Z_{n1} & Z_{n2} \cdots\cdots Z_{ni} \cdots\cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -I_f \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

los voltajes son medidos con respecto al bus auxiliar, son todos desconocidos excepto v_i que de acuerdo con la Fig.   vale -1 p.u. Las --- corrientes todas valen cero, excepto la del nodo i que es -If; el signo menos debido a que es una corriente que se extrae del nodo.

Resolviendo para el nodo i

$v_1 = Z_{1i}(-If)$

$v_2 = Z_{2i}(-If)$

$v_i = Z_{ii}(-If)$

$v_n = Z_{ni}(-If)$

como en $v_i = Z_{ii}(-If)$ $v_i = -1$

entonces

$$-If = \frac{-1}{Z_{ii}} =$$

$$If = \frac{1}{Z_{ii}}$$

Lo que indica que Z_{ii} es forzosamente la impedancia de Thevenin medida en el nodo i.

$$v_1 = -\frac{Z_{1i}}{Z_{ii}}$$

$$v_2 = -\frac{Z2i}{Z_{ii}}$$

$$\vdots$$

$$v_n = -\frac{Z_{ni}}{Z_{ii}}$$

Para calcular sistemáticamente los voltajes:

Para $j = 1, n \quad (j \neq i) \qquad v_j = 1 + v_j$

o sea: $\qquad v_j = 1 - \frac{Zji}{Zii}$

ya que el bus de referencia (bus auxiliar) está a potencial 1 pu. -- con respecto a tierra.

Para el cálculo sistemático de la corriente en algún elemento o en - todos de la red para falla en el bus i:

$$I_{M-N} = \frac{V_M - V_N}{z_{M-N}} = \frac{-\frac{Z_{Mi}}{Z_{ii}} + \frac{Z_{Ni}}{Z_{ii}}}{z_{MN}}$$

$$\boxed{I_{M-N} = \frac{-Z_{Mi} + Z_{Ni}}{Z_{ii} \quad z_{MN}}}$$

Z_{ii}, Z_{Mi}, Z_{Ni} elementos de la matriz Z bus.

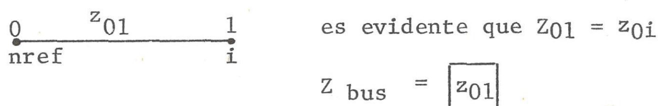
z_{M-N} impedancia propia del elemento que conecta los buses M - N

Si observamos cualquiera de las relaciones que se usarían para el cálculo de voltajes o corrientes, notaremos que en todos intervienen únicamente impedancias propias o elementos de la matriz Z bus. Lo anterior quiere decir que la matriz Z bus contiene toda la información que se necesita para el cálculo de Cortos-circuitos.

Resumiendo el procedimiento empleado: Se formó Y bus por inspección, a partir de Y bus mediante una inversión se obtuvo Z bus, usando los elementos de Z bus y el artificio para poner el nodo de referencia a potencial 1 pu., se obtuvieron las corrientes y voltajes en la red. Cuando la malla es compleja (compleja en cuanto a tamaño y en cuanto a impedancias con parte real e imaginaria) es desde todos puntos de vista ventajoso usar el algoritmo que se fundamenta y describe enseguida para formar Z bus.

Cuando el elemento es radial existen tres posibilidades:

1) Si se inicia el procedimiento o ensamble de la red a partir del nodo de referencia



es evidente que $Z_{01} = z_{0i}$

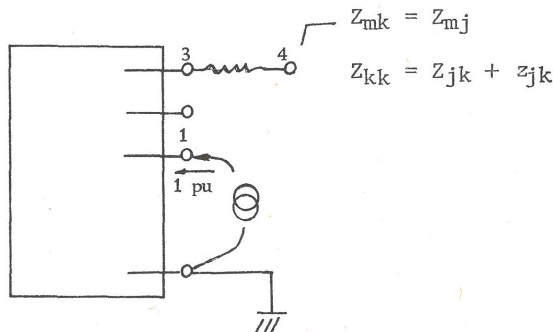
$$Z_{bus} = \boxed{z_{01}}$$

tal relación se usará una sola vez e implica que necesariamente el bus 1 está conectado a tierra (shunt)

2) Si j y k como subíndices definen los nodos de conexión y m es el renglón del elemento calculado, entonces la relación

$$Z_{mk} = Z_{mj} \qquad j = k - 1$$

Se usará para calcular <u>los elementos no diagonales</u> de Z_{bus}. Lo anterior se explica si consideramos que a una red existente le agregamos el elemento 3 - 4



✓	✓	Z_{13}	Z_{14}
✓	✓	Z_{23}	Z_{24}
✓	✓	Z_{33}	Z_{34}
			Z_{44}

elementos conocidos — elementos calculados

$$Z_{mk} = Z_{mj}$$
$$Z_{14} = Z_{13}$$
$$Z_{24} = Z_{23}$$
$$Z_{34} = Z_{33}$$

Dado que $\left[\bar{E}\right] = \left[\bar{Z}\ bus\right]\left[\bar{I}\ bus\right]$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Para $I_1 = 1$ pu. $I_2 = I_3 = I_4 = 0$ y:

$$E_4 = Z_{41} \times I_1$$

$$E_3 = Z_{31} \times I_1$$

como $E_4 = E_3 = Z_{41} = Z_{31}$ ó $Z_{13} = Z_{14}$

3) Para los elementos diagonales, si inyectamos $I_4 = 1$ pu. en 4 entonces

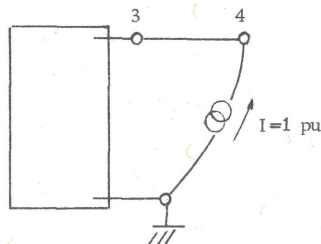
$I_1 = I_2 = I_3 = 0$ e $I_4 = 1$ pu. y:

$$E_1 = Z_{14} I_4$$

$$E_2 = Z_{24} I_4$$

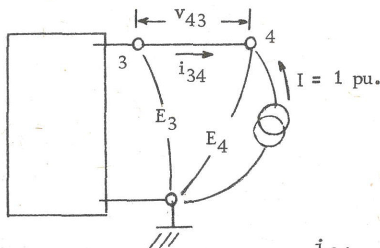
$$E_3 = Z_{34} I_4$$

$$E_4 = Z_{44} I_4$$



como $I_4 = 1$ pu. $Z_{44} = E_4$

y E_4 vale:



$$i_{34} = -1 = v_{34}\, y_{34}$$

entonces $v_{34} = -\dfrac{1}{y_{34}}$; $E_3 - E_4 = -\dfrac{1}{y_{34}}$

Si: $E_3 - E_4 = -\dfrac{1}{y_{34}}$; $E_4 = E_3 + \dfrac{1}{y_{34}}$

como $\quad E_3 = Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 + Z_{34}I_4$

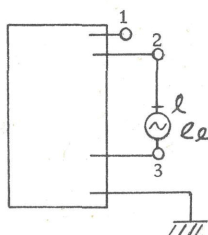
$\qquad\quad E_3 = Z_{34}$

entonces y:

como $\quad Z_{34} = Z_{33}$ $\qquad\qquad E_4 = Z_{34} + z_{34}$

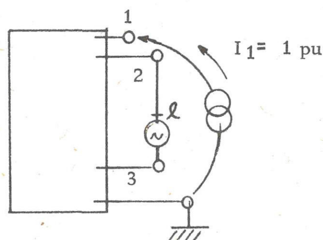
$$\boxed{E_4 = Z_{33} + z_{34}}$$

Cuando un elemento conecta dos nodos ya existentes, se hace necesario el uso de un nodo ficticio o postizo "ℓ" que más adelante se elimina. El procedimiento es el siguiente: supongamos que el elemento -- por conectar une los nodos 2 y 3; a este elemento le agregamos -- cercana al nodo 3 una fuente peculiar de tensión e_ℓ que hará que la corriente en el elemento agregado sea cero.



Como $E_{Bus} = Z_{Bus}\ I_{Bus}$

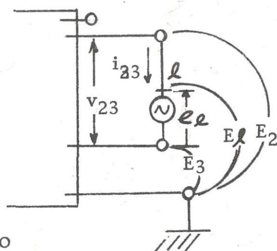
$$\begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \\ e_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z11 & Z12 & Z13 & Z1\ell \\ Z21 & Z22 & Z23 & Z2\ell \\ Z31 & Z32 & Z33 & Z3\ell \\ Z\ell 1 & Z\ell 2 & Z\ell 3 & Z\ell\ell \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I\ell \end{bmatrix}$$



Si inyectamos en el nodo 1 $\quad I1 = 1$ pu

$$E1 = Z11\ I1$$
$$E2 = Z21\ I1$$
$$E3 = Z31\ I1$$
$$e_\ell = Z\ell 1\ I1$$

Como $\quad I1 = 1$ pu $\quad$ entonces $\quad Z\ell 1 = e_\ell$



Si suponemos que el elemento - 2-ℓ es radial, consideración - que puede hacerse dado que --- $i_{2\ell} = 0$, entonces:

$$i_{2\ell} = y_{2\ell}\ v_{2\ell} \quad \text{como } i_{2\ell} = 0$$

$$v_{2\ell} = 0$$

Por lo tanto

$$e_\ell = E_2 - E_3$$

$$Z_{\ell 1} = Z_{21} - Z_{31}$$

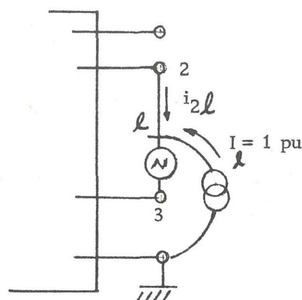
Generalizando

$$\boxed{Z_{\ell i} = Z_{pi} - Z_{qi}}$$

Para obtener el elemento $Z_{\ell\ell}$, inyectamos $I_\ell = 1$ pu. en el nodo ℓ

Evidentemente $I_1 = I_2 = I_3 = 0 \qquad I_\ell = 1$

Obtenemos por lo tanto:



$$E_1 = Z_{1\ell}\, I_\ell$$
$$E_2 = Z_{2\ell}\, I_\ell$$
$$E_3 = Z_{3\ell}\, I_\ell$$
$$e_\ell = Z_{\ell\ell}\, I_\ell$$

como $I_\ell = 1$ pu. $\qquad e_\ell = Z_{\ell\ell}$

Si $\quad i_{2\ell} = -I_\ell = -1 = y_{2\ell}\, v_{2\ell} \qquad\qquad v_{2\ell} = -\dfrac{1}{y_{2\ell}}$

Dado que la fuente de tensión se conecta vecina al nodo 3 la totalidad de la admitancia 2 - 3 queda entre los nodos 2, ℓ por lo que

$$v_{2\ell} = \frac{1}{y_{23}} = z_{23}$$

Como $\qquad e_\ell = E_2 - E_3 - v_{2\ell} = Z_{2\ell} - Z_{3\ell} + z_{23} = Z_{\ell\ell}$

Generalizando $\quad \boxed{Z_{\ell\ell} = Z_{p\ell} - Z_{q\ell} + z_{pq}}$

Si p es nodo de referencia $Z_{p\ell} = 0$ y:

$$\boxed{Z_{\ell\ell} = -Z_{q\ell} + z_{pq}}$$

El procedimiento termina cuando se elimina el nodo ℓ poniendo en corto-circuito la fuente peculiar e_ℓ. Es evidente que:

$$\bar{E}\text{ bus} = \bar{Z}\text{ bus}\ \bar{I}\text{ bus} + \bar{Z}_{i\ell}\, I_\ell$$

y que: $\qquad e_\ell = \bar{Z}_{\ell j}\, \bar{I}_{bus} + Z_{\ell\ell} I_\ell = 0$

$$I_\ell = -\frac{\bar{Z}_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}\, \bar{I}_{bus}$$

$$\bar{E}\text{ bus} = \left(\bar{Z}\text{ bus} - \frac{\bar{Z}_{i\ell}\, \bar{Z}_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}\right) \bar{I}\text{ bus}$$

La matriz Z bus requerida será:

$$Z\,(\text{bus nueva}) = Z\,(\text{bus vieja}) - \frac{\bar{Z}_{i\ell}\, \bar{Z}_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}$$

y hablando de elementos $\quad \boxed{Z_{ij(n)} = Z_{ij(v)} - \dfrac{Z_{i\ell}\, Z_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}}$

OBTENCION DE LA MATRIZ "Z bus" AGREGANDO ELEMENTO "pq"

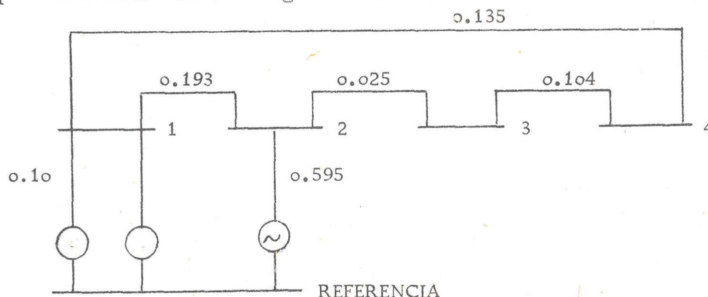
La tabla que se anota enseguida condensa las fórmulas o recetas que se necesitan para formar Z bus; puede extenderse por supuesto, para tomar en cuenta acoplamientos mutuos; se pretende sin embargo, mostrar su uso en la forma más sencilla posible. "p" deberá ser siempre el nodo de salida, "q" siempre el de llegada. Cada vez que se agrega una rama, la matriz aumenta de rango; cada vez que se agrega una cuerda se usa un nodo postizo "ℓ" que se elimina enseguida, sin aumentar el rango de la matriz.

	"p" No es Nodo de Referencia	"p" Si es Nodo de Referencia
RAMA (Agrega Nuevo Nodo)	$Z_{qi} = Z_{pi}$ $i \neq q$	$Z_{qi} = 0$ $i \neq q$
	$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq}$ $i = q$	$Z_{qq} = z_{pq}$ $i = q$
CUERDA (No Agrega Nuevo Nodo)	$Z_{\ell i} = Z_{pi} - Z_{qi}$ $i \neq \ell$	$Z_{\ell i} = - Z_{qi}$ $i \neq \ell$
	$Z_{\ell\ell} = Z_{p\ell} - Z_{q\ell} + z_{pq}$ $i = \ell$	$Z_{\ell\ell} = - Z_{q\ell} + z_{pq}$ $i = \ell$

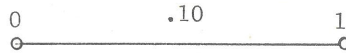
Modificación de Elementos para Eliminar Nodo "ℓ"

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{i\ell} Z_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}$$

La red por resolver es la siguiente:



NOTA.- Se toma como referencia el número menor



Agrega nuevo bus

$p = 0$ (nodo de salida)

$q = 1$ (nodo de llegada)

$i = 0, 1$

"p" Si es nodo de referencia

$Z_{qi} = 0$

$Z_{10} = 0$

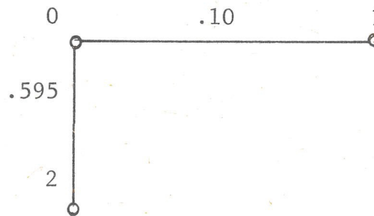
$Z_{qq} = z_{pq}$

$Z_{11} = z_{01} = 0.10$

	0	1
0	0	0
1	0	.10

Z_{bus} = (matriz anterior)

Puesto que todos los elementos del renglón 0 y todos los de la columna 0 son ceros en la matriz Z_{bus}, para simplificar no se escribirán de aquí en adelante.



Agrega nuevo bus:

$p = 0$

$q = 2$

$i = 0, 1, 2$

"p" Si es nodo de referencia

$Z_{qi} = 0$

$Z_{20} = 0$

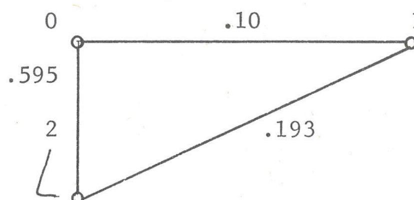
$Z_{21} = 0$

$Z_{qq} = z_{pq}$

$Z_{22} = z_{02} = .595$

Z_{bus} =

	1	2
1	.10	0
2	0	.595



"p" No es nodo de referencia

No agrega nuevo bus:

$p = 1$

$q = 2$

$i = 0, 1, 2$

$Z_{\ell i} = Z_{pi} - Z_{qi}$

$Z_{\ell 0} = Z_{10} - Z_{20} = 0$

$Z_{\ell 1} = Z_{11} - Z_{21} = 0.10$

$Z_{\ell 2} = Z_{12} - Z_{22} = -0.595$

$Z_{\ell\ell} = Z_{p\ell} - Z_{q\ell} + z_{pq} =$
$Z_{1\ell} - Z_{2\ell} + z_{12}$

$Z_{\ell\ell} = .10 + .595 + .193 = .888$

Z_{bus} =

	1	2	ℓ
1	.10	0	.10
2	0	.595	-.595
ℓ	.10	-.595	.888

Eliminación del nodo auxiliar "ℓ"

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{i\ell}\, Z_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}$$

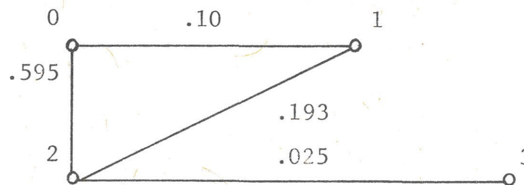
$i = 1$, $j = 1$ $\qquad Z_{11} = .10 - \frac{(.10)(.10)}{.888} = .10 - .0113 = .0887$

$i = 1$, $j = 2$ $\qquad Z_{12} = 0 - \frac{(.10)(-.595)}{.888} = .0673$

$i = 2$, $j = 2$ $\qquad Z_{22} = .595 - \frac{(-.595)(-.595)}{.888} = .595 - .398 = .197$

Z bus =

	1	2
1	.0887	.0673
2	.0673	.197



Agrega nuevo bus

$p = 2$

$q = 3$

$i = 0, 1, 2, 3$

"p" No es nodo de referencia

$Z_{qi} = Z_{pi}$

$Z_{30} = 0$

$Z_{31} = Z_{21} = .0673$

$Z_{32} = Z_{22} = .197$

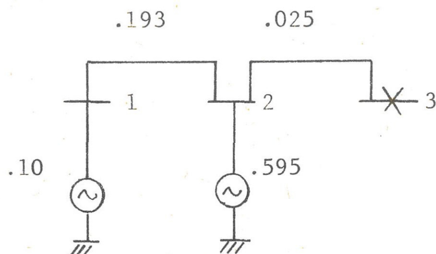
$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq} = Z_{23} + z_{23}$

$Z_{33} = .197 + .025 = .222$

Z bus =

	1	2	3
1	.0887	.0673	.0673
2	.0673	.197	.197
3	.0673	.197	.222

Comprobación: Zbus contiene información de la red configurada como sigue (nodos 1, 2, 3)



.293	.595
3.41297	1.68067
.19632	
5.09364	

Calculado a mano el corto en 3 vale:

$$\frac{1}{X_F} = \frac{1}{.22132} = 4.51828$$

la máquina de .10 aporta

$$I = 4.518 \ \frac{3.41297}{5.09364} = 3.02745 \text{ pu}$$

La de reactancia de .595 aporta

$$I = 4.518 \ \frac{1.68067}{5.09364} = 1.49083 \text{ pu}$$

A partir de Zbus:

		1	2	3
	1	.0887	.0673	.0673
$Z_{bus}=$	2	.0673	.197	.197
	3	.0673	.197	.222

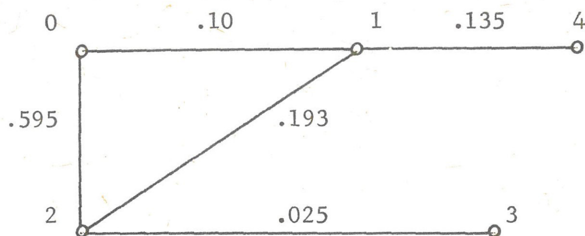
Obtenemos:

$$I_F = \frac{1}{Z_{33}} = \frac{1}{.222} = 4.50$$

Como: $$I_{MN} = \frac{-Z_{Mi} + Z_{Ni}}{Z_{ii} \ z_{MN}}$$

$$I_{01} = \frac{-Z_{03} + Z_{13}}{Z_{33} \times z_{01}} = \frac{-0 + .0673}{.222 \times .10} = 3.03 \text{ pu}$$

$$I_{02} = \frac{-Z_{03} + Z_{23}}{Z_{33} \times z_{02}} = \frac{-0 + .197}{.222 \times .595} = 1.49 \text{ pu}$$



Agrega nuevo bus:

$p = 1$

$q = 4$

$i = 0, 1, 2, 3, 4$

"p" No es nodo de referencia

$Z_{qi} = Z_{pi}$

$Z_{40} = Z_{10} = 0$

$Z_{41} = Z_{11} = .0887$

$Z_{42} = Z_{12} = .0673$

$Z_{43} = Z_{13} = .0673$

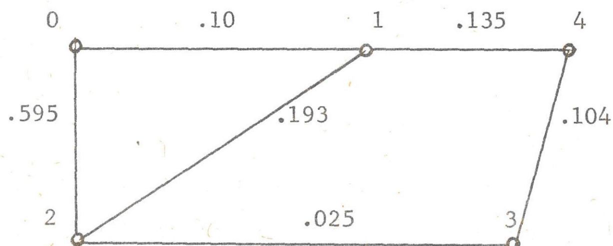
$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq}$

$Z_{44} = Z_{14} + z_{14}$

$Z_{44} = .0887 + .135 = .2237$

$Z_{bus} =$

	1	2	3	4
1	.0887	.0673	.0673	.0887
2	.0673	.197	.197	.0673
3	.0673	.197	.222	.0673
4	.0887	.0673	.0673	.2237



No agrega nuevo bus

$p = 3$

$q = 4$

$i = 0, 1, 2, 3, 4$

"p" no es nodo de referencia

$Z_{\ell i} = Z_{pi} - Z_{qi}$

$Z_{\ell 0} = Z_{30} - Z_{40} = 0$

$Z_{\ell 1} = Z_{31} - Z_{41} = .0673 - .0887 = -.0214$

$Z_{\ell 2} = Z_{32} - Z_{42} = .197 - .0673 = .1297$

$Z_{\ell 3} = Z_{33} - Z_{43} = .222 - .0673 = .1547$

$Z_{\ell 4} = Z_{34} - Z_{44} = .0673 - .2237 = -.1564$

$Z_{\ell\ell} = Z_{p\ell} - Z_{q\ell} + z_{pq} = Z_{3\ell} - Z_{4\ell} + z_{34}$

$Z_{\ell\ell} = .1547 + .1564 + .104 = .4151$

Z bus =

	1	2	3	4	ℓ
1	.0887	.0673	.0673	.0887	-.0214
2	.0673	.197	.197	.0673	.1297
3	.0673	.197	.222	.0673	.1547
4	.0887	.0673	.0673	.2237	-.1564
ℓ	-.0214	.1297	.1547	-.1564	.4151

Eliminación del nodo auxiliar "ℓ"

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{i\ell} Z_{\ell j}}{Z_{\ell\ell}}$$

$i = 1$, $j = 1$ $\quad Z_{11} = .0887 - \frac{(-.0214)(-.0214)}{.4151} = .0887 - .0011 = .0876$

$i = 1$, $j = 2$ $\quad Z_{12} = .0673 - \frac{(-.0214)(.1297)}{.4151} = .0673 + .00669 = .074$

$i = 1$, $j = 3$ $\quad Z_{13} = .0673 - \frac{(-.0214)(.1547)}{.4151} = .0673 + .00798 = .0753$

$i = 1$, $j = 4$ $\quad Z_{14} = .0887 - \frac{(-.0214)(-.1564)}{.4151} = .0887 - .0080 = .0807$

$i = 2$, $j = 2$ $\qquad Z_{22} = .197 - \frac{(.1297)(.1297)}{.4151} = .197 - .0405 = .1565$

$i = 2$, $j = 3$ $\qquad Z_{23} = .197 - \frac{(.1297)(.1547)}{.4151} = .197 - .0482 = .1488$

$i = 2$, $j = 4$ $\qquad Z_{24} = .0673 - \frac{(.1297)(-.1564)}{.4151} = .0673 - .0488 = .1161$

$i = 3$, $j = 3$ $\qquad Z_{33} = .222 - \frac{(.1547)(.1547)}{.4151} = .222 - .0575 = .1645$

$i = 4$, $j = 4$ $\qquad Z_{44} = .2237 - \frac{(-.1564)(-.1564)}{.4151} = .2237 - .0590 = .1647$

$i = 3$, $j = 4$ $\qquad Z_{34} = .0673 - \frac{(.1547)(-.1564)}{.4151} = .0673 + .0582 = .1255$

Z bus =

	1	2	3	4
1	.0876	.074	.0753	.0807
2	.074	.1565	.1488	.1161
3	.0753	.1488	.1645	.1255
4	.0807	.1161	.1255	.1647

En esta matriz quedó comprendida la información total de la red, mediante la aplicación sistemática de la fórmula:

$$I_{M-N} = \frac{-Z_{Mi} + Z_{Ni}}{Z_{ii} \quad z_{MN}}$$

se podrán obtener los valores totales de falla y las contribuciones.

APENDICE F

INSTRUCTIVO Y LISTADO DEL PROGRAMA TRIFA

Este programa sirve para calcular cortos circuitos trifásicos e impedancia de Thevenin en cada uno de los nodos de la red dato, así como también las contribuciones de los buses adyacentes al fallado.

Se basa en el método de formación directa de Z bus.

Para su utilización, tras llamarlo por medio del comando

GET - TRIFA

se le deben dar las siguientes líneas de datos:

A).-De datos generales:

```
6000 DATA  NREF, NBUSES, NLINEAS
```

donde:

NREF	es el número del bus de referencia (normalmente cero)
NBUSES	es el número de buses de la red considerada
NLINEAS	es el número de líneas que constituyen la red

B).-De datos de nodos:

```
6010 DATA  N1, N2, N3, N4, N5
6020 DATA  N6, N7 ....
  .
  .
  .
```

Hasta la línea 6990

donde:

N1, N2...	son los números de los buses dados en el orden en que se desea que aparezcan en la salida

C).-De datos de líneas:

```
7010 DATA  NENV(1), NREC(1), X(1)
7020 DATA  NENV(2), NREC(2), X(2)
  .
  .
  .
```

Hasta la línea 7990

donde:

NENV es el número del nodo de envío de cada línea

NREC es el número del nodo de recepción de cada línea

X es la reactancia serie de la línea de la que - se acaban de dar los nodos terminales.

Durante la ejecución del programa, al terminar de imprimir los resultados, el programa pregunta si se desea cinta perforada con - los valores de impedancia de Thevenin secuencia positiva, ya duplicados (para usarse en el programa de cortos circuitos monofásicos). Una respuesta afirmativa hará que se solicite al usuario que en- - cienda el perforador de cinta, el cual deberá ser apagado al finalizar la cinta.

TRIFA

```
1000  REM  *****************   T R I F A   *********************
1020  REM
1040  REM
1060  REM  ESTE PROGRAMA CALCULA EL CORTO CIRCUITO TRIFASICO
1080  REM  Y LA IMPEDANCIA DE THEVENIN Y PERFORA ESTA ULTIMA
1100  REM  PARA ENCADENARSE (SI SE DESEA) CON MONOFA.
1120  REM     LOS DATOS SON:
1140  REM     6000 DATA NREF,NBUSES, NLINEAS
1160  REM     6010 DATA NODOS EN EL ORDEN QUE SE DESEA PARA LA SALIDA
1180  REM        '
1200  REM        '
1220  REM     6990  COMO LINEA FINAL PERMISIBLE
1240  REM     7010 DATA NENV(1),NREC(1),REACT(1)
1260  REM     7020 DATA NENV(2),NREC(2),REACT(2)
1280  REM        '
1300  REM        '
1320  REM     7990  COMO LINEA FINAL PERMISIBLE
1340  REM  EMPIEZA EL PROGRAMA------------------------------------
1360  REM
1380  REM
1400  DIM Z[30,30],I[30],K[30],P[50],Q[50],X[50],A$[10]
1420  REM  [Z], [I] Y [K]  NECESITAN DIMENSION DE NBUSES
1440  REM  [P], [Q] Y [X]  NECESITAN DIMENSION DE NLINEAS
1460  REM
1480  REM  EMPIEZA LA EJECUCION DEL PROGRAMA
1500  REM
1520  READ I4,N2,N1
1540  FOR I=1 TO N2
1560  D=5
1580  READ K[I]
1600  NEXT I
1620  FOR I=1 TO N1
1640  READ P[I],Q[I],X[I]
1660  NEXT I
1680  L=1
1700  FOR I=1 TO N1
1720  L1=L-1
1740  GOSUB 3000
1760  NEXT I
1780  GOSUB 5000
1800  PRINT ""
1820  FOR A=1 TO 70
1840  PRINT "-";
1860  NEXT A
1880  PRINT "-"
1900  PRINT "";TAB(20);"COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD"
1920  PRINT TAB(20);"OFICINA DE INGENIERIA PRELIMINAR"
1940  PRINT TAB(24);"CORTO CIRCUITO TRIFASICO"
1960  PRINT TAB(26);"FALLA TOTAL (P.U.)     EN EL BUS      'XTH+'"
1980  PRINT "DEL BUS   VIENEN (P.U.)"
```

F-4

TRIFA

```
2000  FOR I=1 TO N2
2020  C1=1/Z[I,I]
2040  PRINT ""
2060  FOR A=1 TO 29
2080  PRINT ">";
2100  NEXT A
2120  PRINT SGN(C1)*INT(ABS(C1*10000)+.5)*.0001;
2140  PRINT TAB(51);K[I];TAB(60);
2160  PRINT SGN(Z[I,I])*INT(ABS(Z[I,I]*1.E+06)+.5)*.000001
2180  FOR J=1 TO N1
2200  IF I=P[J] THEN 2280
2220  IF I#Q[J] THEN 2460
2240  I5=P[J]
2260  GOTO 2300
2280  I5=Q[J]
2300  IF I5=0 THEN 2400
2320  C2=(1-Z[I,I5]*C1)/X[J]
2340  PRINT " ";I[I5];TAB(11);
2360  PRINT SGN(C2)*INT(ABS(C2*10000)+.5)*.0001
2380  GOTO 2460
2400  C2=1/X[J]
2420  PRINT " ";I5;TAB(11);
2440  PRINT SGN(C2)*INT(ABS(C2*10000)+.5)*.0001
2460  NEXT J
2480  NEXT I
2500  PRINT ""
2520  FOR A=1 TO 71
2540  PRINT "-";
2560  NEXT A
2600  PRINT "QUIERES QUE PERFORE LAS IMPEDANCIAS ";
2620  INPUT A$
2640  IF A$="NO" THEN 2920
2660  PRINT "PRENDE LA PERFORADORA POR FAVOR ";
2680  ENTER D,D1,D2
2700  PRINT ""
2720  FOR I=1 TO 15
2740  PRINT "";
2760  NEXT I
2780  FOR I=1 TO N2
2800  PRINT 6000+10*I;"DATA";K[I];",";2*Z[I,I]
2820  NEXT I
2840  FOR I=1 TO 15
2860  PRINT "";
2880  NEXT I
2900  ENTER D,D1,D2
2920  PRINT ""
2940  STOP
```

```
3000  REM   S U B R U T I N A  - - -   ' Z - B U S '  - - -
3020  FOR J=1 TO L
3040  Z[L,J]=Z[J,L]=0
3060  NEXT J
3080  IF Q[I]#I4 THEN 3180
3100  P=Q[I]
3120  Q[I]=P[I]
3140  P[I]=P
3160  GOTO 3720
3180  IF P[I]=I4 THEN 3720
3200  IF L1 <= 0 THEN 3720
3210  B=0
3220  A=1
3240  FOR J=1 TO L1
3260  IF I[J]=P[I] THEN 3640
3280  NEXT J
3300  IF B=0 THEN 3500
3320  IF I+A>N1 THEN 3600
3340  P=P[I+A]
3360  P[I+A]=P[I]
3380  P[I]=P
3400  P=Q[I+A]
3420  Q[I+A]=Q[I]
3440  Q[I]=P
3460  A=A+1
3470  B=0
3480  GOTO 3240
3500  P=Q[I]
3520  Q[I]=P[I]
3540  P[I]=P
3560  B=1
3580  GOTO 3240
3600  PRINT "ERROR. HAY DOS O MAS REDES AISLADAS"
3620  STOP
3640  LET M=J
3660  FOR J=1 TO L
3680  Z[J,L]=Z[L,J]=Z[L,J]+Z[J,M]
3700  NEXT J
3720  Z[L,L]=Z[L,L]+X[I]
3740  IF L1 <= 0 THEN 3820
3760  FOR J=1 TO L1
3780  IF I[J]=Q[I] THEN 3880
3800  NEXT J
3820  I[L]=Q[I]
3840  L=L+1
3860  RETURN
3880  N=J
3900  FOR J=1 TO L1
3920  Z[J,L]=Z[L,J]=Z[L,J]-Z[N,J]
3940  NEXT J
3960  IF P[I]=I4 THEN 4020
3980  Z[L,L]=Z[M,L]-Z[N,L]+X[I]
```

F-6

TRIFA

```
4000  GOTO 4040
4020  Z[L,L]=-Z[N,L]+X[I]
4040  FOR J=1 TO L1
4060  FOR K=1 TO L1
4080  Z[J,K]=Z[J,K]-Z[J,L]*Z[K,L]/Z[L,L]
4100  NEXT K
4120  NEXT J
4140  RETURN
```

TRIFA

```
5000  REM   S U B R U T I N A  ---  'ØRDEN'  ---
5020  FOR I=1 TO N2
5040  FOR K=1 TO N2
5060  IF I[K]=K[I] THEN 5120
5080  NEXT K
5100  GOTO 9000
5120  K2=I[I]
5140  I[I]=I[K]
5160  I[K]=K2
5180  FOR J=1 TO N2
5200  Y=Z[I,J]
5220  Z[I,J]=Z[K,J]
5240  Z[K,J]=Y
5260  NEXT J
5280  FOR J=1 TO N2
5300  Y=Z[J,I]
5320  Z[J,I]=Z[J,K]
5340  Z[J,K]=Y
5360  NEXT J
5380  NEXT I
5400  RETURN
```

F-8

TRIFA

```
6000  DATA 0,3,4
6010  DATA 1,2,3
7010  DATA 0,1,.1
7020  DATA 0,3,.2
7030  DATA 1,2,.5
7040  DATA 2,3,.4
9000  PRINT "EL NODO ";K[I];"ES UN NODO AISLADO"
9999  END
```

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
OFICINA DE INGENIERIA PRELIMINAR
CORTO CIRCUITO TRIFASICO

DEL BUS	VIENEN (P.U.)	FALLA TOTAL (P.U.)	EN EL BUS	'XTH+'
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		10.9091	1	.091667
0	10			
2	.9091			
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		3.3333	2	.3
1	1.6667			
3	1.6667			
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		6	3	.166667
0	5			
2	1			

F-10

```
QUIERES QUE PERFORE LAS IMPEDANCIAS ?SI
PRENDE LA PERFORADORA POR FAVOR


6Ø1Ø     DATA 1     , .183333
6Ø2Ø     DATA 2     , .6
6Ø3Ø     DATA 3     , .333333


DONE
```

INSTRUCTIVO Y LISTADO DEL PROGRAMA MONOFA.

Este programa sirve para calcular cortos circuitos monofásicos e impedancia de Thevenin en cada uno de los nodos de la red dato, así - como también las contribuciones de los buses adyacentes al fallado.

Se basa en el método de formación directa de Z bus

Para su utilización, tras llamarlo por medio del comando

GET - MØNØFA

se le deben dar las siguientes líneas de datos:

A).- De datos generales:

```
6000  DATA  NREF, NBUSES, NLINEAS
```

donde:

NREF	es el número del bus de referencia -- (normalmente cero)
NBUSES	es el número de buses de la red considerada
NLINEAS	es el número de líneas que constituyen la red

B).- De datos de nodos:

```
6010  DATA  NODO(1), 2XPOS(1)
6020  DATA  NODO(2), 2XPOS(2)
  .
  .
  .
Hasta la línea 6990
```

donde:

NODO(1),NODO(2) ...	son los números de los buses dados en el orden en que se desea que aparezcan en la salida
2XPOS(1),2XPOS(2)...	son las impedancias de Thevenin de secuencia positiva correspondientes a cada nodo y duplicadas (generalmente estos datos de nodos vienen en la salida en cinta que arrojó "TRIFA")

F-12

C).- De datos de líneas:

```
7010  DATA  NENV(1), NREC(1), XO(1)
7020  DATA  NENV(2), NREC(2), XO(2)
 .
 .
 .
```

Hasta la línea 7990

donde:

NENV es el número del nodo de envío de cada línea

NREC es el número del nodo de recepción de cada - línea

XO es la reactancia serie de secuencia cero de_ la línea de la que se acaban de dar los no-- dos terminales.

MONOFA

```
1000  REM  *****************   M O N O F A   **********************
1020  REM
1040  REM  ESTE PROGRAMA CALCULA EL CORTO CIRCUITO MONOFASICO
1060  REM  Y LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO Y LAS CONTRIBUCIO-
1080  REM  NES A LA FALLA EN LAS RAMAS VECINAS AL NODO FALLADO.
1100  REM   LOS DATOS SON:
1120  REM      6000 DATA  NREF, NBUSES, NLINEAS
1140  REM      6010 DATA NODO(1), 2X+(1)
1160  REM      6020 DATA NODO(2), 2X+(2)
1180  REM        '
1200  REM        '
1220  REM      6990  COMO LINEA FINAL PERMISIBLE
1240  REM  ---LOS DATOS DE NODOS NORMALMENTE VIENEN DE LA
1260  REM  ---SALIDA EN CINTA QUE ARROJO "TRIFA".
1280  REM      7010 DATA NENV(1), NREC(1), X0(1)
1300  REM      7020 DATA NENV(2), NREC(2), X0(2)
1320  REM        '
1340  REM        '
1360  REM      7990  COMO LINEA FINAL PERMISIBLE
1380  REM  EMPIEZA EL PROGRAMA ------------------------------------
1400  REM
1420  REM
1440  DIM Z[30,30],I[30],K[30],S[30],P[50],Q[50],X[50]
1460  REM   [Z],  [I],  [K] Y [S]   NECESITAN DIMENSION  NBUSES
1480  REM   [P],  [Q] Y [X]         NECESITAN DIMENSION  NLINEAS
1500  REM
1520  REM  EMPIEZA LA EJECUCION DEL PROGRAMA
1540  REM
1560  READ I4,N2,N1
1580  FOR I=1 TO N2
1600  READ K[I],S[I]
1620  NEXT I
1640  FOR I=1 TO N1
1660  READ P[I],Q[I],X[I]
1680  NEXT I
1700  L=1
1720  FOR I=1 TO N1
1740  L1=L-1
1760  GOSUB 3000
1780  NEXT I
1800  GOSUB 5000
1820  PRINT ""
1840  FOR A=1 TO 70
1860  PRINT "-";
1880  NEXT A
1900  PRINT "-"
1920  PRINT "";TAB(20);"COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD"
1940  PRINT TAB(20);"OFICINA DE INGENIERIA PRELIMINAR"
1960  PRINT TAB(24);"CORTO CIRCUITO MONOFASICO"
1980  PRINT TAB(26);"FALLA TOTAL (P.U.)    EN EL BUS     'XTH0'"
```

F-14

MONOFA

```
2000  PRINT "DEL BUS   VIENEN (P.U.)"
2020  FOR I=1 TO N2
2040  C1=3/(Z[I,I]+S[I])
2060  PRINT ""
2080  FOR A=1 TO 29
2100  PRINT "<";
2120  NEXT A
2140  PRINT SGN(C1)*INT(ABS(C1*10000)+.5)*.0001;
2160  PRINT TAB(51);K[I];TAB(60);
2180  PRINT SGN(Z[I,I])*INT(ABS(Z[I,I]*1.E+06)+.5)*.000001
2200  FOR J=1 TO N1
2220  IF I=P[J] THEN 2300
2240  IF I#Q[J] THEN 2480
2260  I5=P[J]
2280  GOTO 2320
2300  I5=Q[J]
2320  IF I5=0 THEN 2420
2340  C2=(Z[I,I]-Z[I,I5])/X[J]*C1
2360  PRINT " ";I[I5];TAB(11);
2380  PRINT SGN(C2)*INT(ABS(C2*10000)+.5)*.0001
2400  GOTO 2480
2420  C2=C1*Z[I,I]/X[J]
2440  PRINT " ";I5;TAB(11);
2460  PRINT SGN(C2)*INT(ABS(C2*10000)+.5)*.0001
2480  NEXT J
2500  NEXT I
2520  PRINT ""
2540  FOR A=1 TO 70
2560  PRINT "-";
2580  NEXT A
2600  PRINT "-"
2620  PRINT ""
2640  STOP
```

1ONOFA

```
3000  REM   S U B R U T I N A   'ZBUSCERO'   - - - - - - - - -
3020  FOR J=1 TO L
3040  Z[L,J]=Z[J,L]=0
3060  NEXT J
3080  IF Q[I]#I4 THEN 3180
3100  P=Q[I]
3120  Q[I]=P[I]
3140  P[I]=P
3160  GOTO 3720
3180  IF P[I]=I4 THEN 3720
3200  IF L1 <= 0 THEN 3720
3210  B=0
3220  A=1
3240  FOR J=1 TO L1
3260  IF I[J]=P[I] THEN 3640
3280  NEXT J
3300  IF B=0 THEN 3500
3320  IF I+A>N1 THEN 3600
3340  P=P[I+A]
3360  P[I+A]=P[I]
3380  P[I]=P
3400  P=Q[I+A]
3420  Q[I+A]=Q[I]
3440  Q[I]=P
3460  A=A+1
3470  B=0
3480  GOTO 3240
3500  P=Q[I]
3520  Q[I]=P[I]
3540  P[I]=P
3560  B=1
3580  GOTO 3240
3600  PRINT "ERROR. HAY DOS O MAS REDES AISLADAS"
3620  STOP
3640  LET M=J
3660  FOR J=1 TO L
3680  Z[J,L]=Z[L,J]=Z[L,J]+Z[J,M]
3700  NEXT J
3720  Z[L,L]=Z[L,L]+X[I]
3740  IF L1 <= 0 THEN 3820
3760  FOR J=1 TO L1
3780  IF I[J]=Q[I] THEN 3880
3800  NEXT J
3820  I[L]=Q[I]
3840  L=L+1
3860  RETURN
3880  N=J
3900  FOR J=1 TO L1
3920  Z[J,L]=Z[L,J]=Z[L,J]-Z[N,J]
3940  NEXT J
3960  IF P[I]=I4 THEN 4020
3980  Z[L,L]=Z[M,L]-Z[N,L]+X[I]
```

F-16

MONOFA

```
4000  GOTO 4040
4020  Z[L,L]=-Z[N,L]+X[I]
4040  FOR J=1 TO L1
4060  FOR K=1 TO L1
4080  Z[J,K]=Z[J,K]-Z[J,L]*Z[K,L]/Z[L,L]
4100  NEXT K
4120  NEXT J
4140  RETURN
```

MONOFA

```
5000  REM    S U B R U T I N A   'ORDEN-CERO'   - - - - - - - - -
5020  FOR I=1 TO N2
5040  FOR K=1 TO N2
5060  IF I[K]=K[I] THEN 5120
5080  NEXT K
5100  GOTO 5420
5120  K2=I[I]
5140  I[I]=I[K]
5160  I[K]=K2
5180  FOR J=1 TO N2
5200  Y=Z[I,J]
5220  Z[I,J]=Z[K,J]
5240  Z[K,J]=Y
5260  NEXT J
5280  FOR J=1 TO N2
5300  Y=Z[J,I]
5320  Z[J,I]=Z[J,K]
5340  Z[J,K]=Y
5360  NEXT J
5380  NEXT I
5400  RETURN
5420  PRINT "EL NODO ";K[I];"ES UN NODO AISLADO"
5440  STOP
```

F-18

MONOFA

```
6000  DATA 0,3,4
6010  DATA 1,.183333
6020  DATA 2,.6
6030  DATA 3,.333333
7010  DATA 0,1,.1
7020  DATA 0,3,.2
7030  DATA 1,2,.5
7040  DATA 2,3,.4
9999  END
```

RUN
MONOFA

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
OFICINA DE INGENIERIA PRELIMINAR
CORTO CIRCUITO MONOFASICO

	FALLA TOTAL (P.U.)	EN EL BUS	'XTHØ'
DEL BUS	VIENEN (P.U.)		
<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<	10.9091	1	.091667
Ø	10		
2	.9091		
<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<	3.3333	2	.3
1	1.6667		
3	1.6667		
<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<	6	3	.166667
Ø	5		
2	1		

APENDICE G.- COMPARACION DE METODOS.

Si decidimos hacer una comparación de los dos métodos matriciales empleados en el cálculo de fallas, se puede concluir lo siguiente:

a) El tiempo de máquina no es un factor crítico en la selección del método puesto que, tanto el método de Z bus como el de Z loop durarán mas o menos tiempo dependiendo de la manera en que se elabore el programa.

b) La "memoria" requerida por la computadora para Z bus es menor principalmente por que el rango de la matriz Z loop es mayor que el de Z bus.

c) Si se emplea el método de Z loop será necesario invertir matrices; en el de Z bus se requerirá la inversión sólo en el caso de existir líneas con acoplamientos mutuos, siendo estas matrices generalmente de rango reducido.

d) Si se emplea el método Z loop, el agregar una línea al sistema hace necesario el cálculo de una nueva Z loop.- Se requiere solo un mínimo de operaciones para modificar la matriz Z bus.

e) En el método de Z loop así como en el de Z bus no se requieren muchas operaciones para eliminar líneas.

f) A partir de la matriz Z bus se pueden obtener equivalentes de una o varias secciones de la red bajo estudio, esto hace posible el análisis de mallas de un número grande de nodos.

CONCLUSION: Se recomienda el método de Z bus para el análisis de fallas con el fin de aprovechar a su máximo el tiempo y la memoria de computadora, al mismo tiempo se tendrá un programa que pueda adaptarse a futuras expansiones de la red y a otros estudios de investigación. El método Z loop es de gran utilidad didáctica, en su desarrollo se hace uso de artificios y teoremas de redes que lo hacen interesante.

APENDICE H SIMPLIFICACION DE Z LOOP.

Supongamos un sistema con N + 1 nodos (n buses y nodo de referencia) "k" links en el sistema de transmisión y "n" links que contengan generadores. Los links y ramas que escogen según el procedimiento programado. Las ecuaciones de malla que describen al sistema tienen la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} E_{kk} \\ \\ E_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{kk} & Z_{kq} \\ \\ Z_{qk} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ \\ I_q \end{bmatrix}$$

donde el subíndice "k" corresponde a variables de las mallas correspondientes a los links del sistema de transmisión, y "q" corresponde a las mallas definidas por los links de fuentes. Z_{kk} es de rango k y Z_{qq} es de rango (q-n + m)

Efectuando el producto matricial se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$E_{kk} = Z_{kk} \quad I_k + Z_{kq} \quad I_q \qquad (1)$$

$$E_{qq} = Z_{qk} \quad I_k + Z_{qq} \quad I_q \qquad (2)$$

La matriz columna E_k, es una matriz nula debido a que las mallas que contienen "links" que se encuentran dentro del sistema de transmisión no tiene generadores. Por lo tanto (1) queda como sigue:

$$0 = Z_{kk} \quad I_k + Z_{kq} \quad I_q$$

Despejando I_k,

$$I_k = - Z_{kk}^{-1} \quad Z_{kq} \quad I_q$$

Substituyendo en ec (2)

$$E_{qq} = Z_{qk} \; (-Z_{kk}^{-1} \quad Z_{kq} \; I_q) + Z_{qq} \quad I_q$$

Si hacemos:

$$(Z_{qq} + Z_{qk} \; Z_{kk}^{-1} \; Z_{kq}) = Z'_{qq}$$

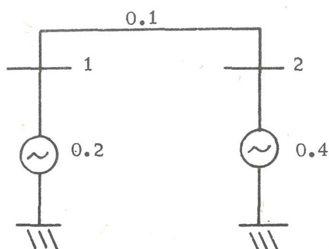
Entonces

$$E = Z'_{qq} \; I_q$$

Donde el rango la matriz Z'_{qq} es igual al número de buses más el número de generadores menos uno.

rango de Z'_{qq} = No. de buses + No. de generadores -1

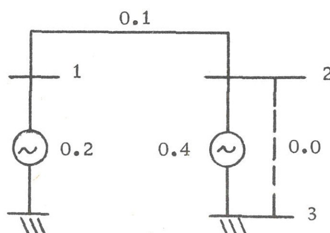
METODOS MATRICIALES DE CALCULO DE FALLAS APLICADOS EN UN SISTEMA DE DOS NODOS



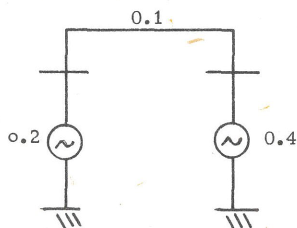
El objeto es obtener una idea de los procedimientos matri-- ciales (Z_{loop} y Z_{bus}) para el cálculo de fallas. Se analiza el sistema de la figura -- primero empleando el método - por mallas y más adelante por nodos.

El sistema elemental (2 nodos) es el de la Fig. 1

La aplicación del método por mallas (Z_{loop}) requiere desde el planteamiento del problema, que en la red aparezca un elemento de impedancia - cero que conecte el bus o nodo con falla a la referencia. Lo anterior se ilustra en la siguiente figura:



La red es de dos mallas y aplicando conocimientos de circuitos eléctricos podrán formarse las ecuaciones de malla por inspección:

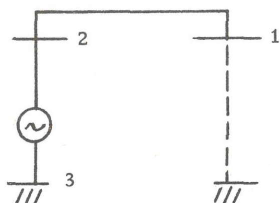


Se forma de la siguiente manera:
Se dibujan sucesivamente los elementos 3-1, 1-2 y 2-3. La malla se formó en el momento de conectar el elemento 2-3 - por esta razón, los elementos 3-1 y 1-2 se denominan como - "BRANCHES".

I-2

Y el elemento que formó la malla 2-3 recibe el nombre de "link".

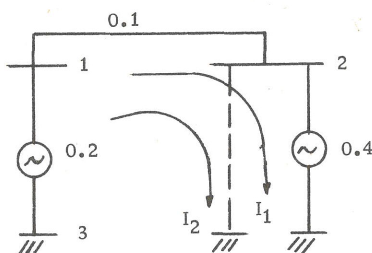
Malla 2



(3-2) y (2-1) BRANCHES

(1-0) LINK

Superponiendo las 2 mallas se obtiene lo siguiente:



Por los elementos catalogados como branches pueden circular una o más corrientes de malla; por los elementos catalogados como links sólo puede circular una.

Corriente de malla

Como consecuencia de lo anterior siempre resultará que la corriente de alguna malla será igual a la corriente del link que la cerró.

A partir de este momento se adopta como signo positivo de las corrientes, el de la que fluye de número menor a mayor (número de nodo).

Formación de las ecuaciones de malla

Para el caso particular actual, para las mallas (1) y (2) respectivamente podemos escribir:

$$V_1 = I_1Z_{11} + I_2Z_{12}$$

$$V_2 = I_1Z_{21} + I_2Z_{22}$$

La ecuación matricial se puede escribir como:

$$[V] = [Z][I]$$

Donde $[Z]$ es de la forma:

Z_{11}	Z_{12}	=	0.7	0.3
Z_{21}	Z_{22}		0.3	0.3

Se le denomina Z_{loop} y contiene los coeficientes de las ecuaciones de malla, siendo simétrica y pudiéndose formar por inspección de la siguiente manera:

Z_{11} es la impedancia propia de la malla 1 y es la suma de la impedancia de los elementos por donde circula I_1.

Z_{12} impedancia mutua entre las mallas 1 y 2 y es la suma de las impedancias comunes a ambas mallas. Este elemento de la matriz será negativo si las corrientes circulan en sentidos contrarios y positivos si las corrientes circulan en la misma dirección.

Por ser matriz simétrica

$$Z_{12} = Z_{21}$$

Z_{22} impedancia propia de la malla 2 y es la suma de la impedancia de los elementos por donde circula I_2

Aplicando los conceptos anteriores se concluye que Z vale:

0.7	0.3
0.3	0.3

Y la ecuación matricial $[V] = [Z]\,[I]$ es:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 \\ 0.3 & 0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

La finalidad del procedimiento es medir la impedancia de Thévenin lo que implica la aplicación de dicho teorema para lo cual se requiere que los voltajes generados internos se pongan en corto circuito conservando la resistencia interna de la fuente.

Por lo anterior el sistema de dos ecuaciones puede escribirse en la siguiente forma:

$$0 = 0.7I_1 + 0.3I_2 \quad - \quad 1$$

$$0 = 0.3I_1 + 0.3I_2 \quad - \quad 2$$

I-4

Artificio.

Se supone conocida I_2 y se le asigna un valor de 1 pu. El sistema original de dos ecuaciones con dos incógnitas se reduce a un sistema de una ecuación con una incógnita.

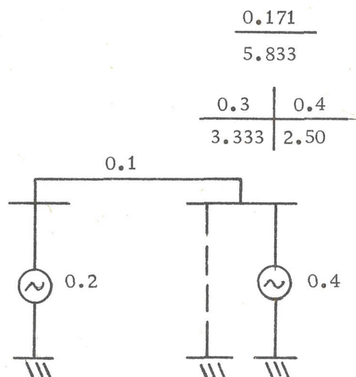
En 1

$$0 = 0.7I_1 + 0.3 \qquad \text{ya que} \quad I_2 = 1 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:

$$I_1 = -\frac{0.3}{0.7} \text{ pu}$$

Este valor de I_1 se pudo obtener porque se supuso $I_2 = 1$ pu. (si $I_2 = 1$ pu como $I_{2-3} = I_2 = 1$ pu la Icc se supuso conocida e igual a 1 pu). Lo más probable es que la solución final del problema dé $I_2 \neq 1$ ($I_2 = 5.833$ pu)



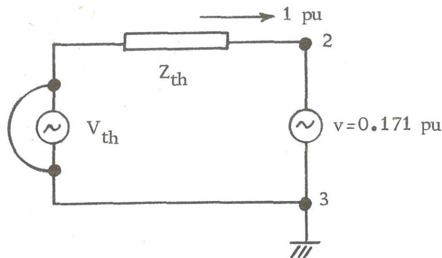
Si en la ecuación de la malla 2 sustituímos los valores reales de I_1 e I_2 debe cumplirse la igualdad con cero.

Si en la ecuación de la malla 2 sustituímos los valores supuestos (no reales) la igualdad no se cumple.

$$0.3 \times \left[-\frac{0.3}{0.7}\right] + 0.3(1) = 0.171$$

0.171 puede considerarse como una fuente de voltaje que debe intercalarse en la malla Núm. 2 para que I_2 sea 1 p.u.

Lo anterior se explica mediante el siguiente diagrama:



De aquí se puede obtener

$Z_{th} = 0.171/1$

De donde $Z_{th} = 0.171$

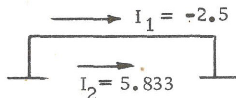
Y por lo tanto $I_{cc} = \frac{1}{0.171}$

$I_{cc} = 5.833$

Al suponer $I_2 = 1$ p.u., tácitamente se inyectó en la malla una corriente de 1 p.u., que al circular por ella da los factores de distribución, por lo tanto, la corriente de la malla 1 vale

$$I_{1\ real} = 5.833 \left(-\frac{0.3}{0.7}\right) = -2.5 \text{ p.u.}$$

Si queremos calcular la corriente en el branch que une los nodos 1 - 2 procederemos como sigue:

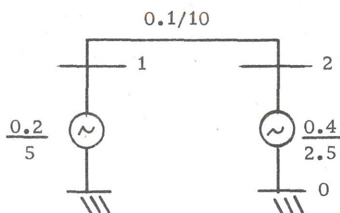


$I_{1-2} = 5.833 - 2.5 = 3.333$

y el problema quedó resuelto.

La aplicación del análisis por nodos (Z_{bus}) consistirá en lo siguiente:

1) Formación por inspección de la matriz Y_{bus} del sistema propuesto. Así:



Y_{11}	Y_{12}
Y_{21}	Y_{22}

Donde Y_{11} es la admitancia propia del nodo 1 , y la suma de las admitancias de los elementos que inciden en 1

Y_{12} es la admitancia mutua entre 1 y 2 (que tienen signo negativo) y es la suma de la admitancia de los elementos que conectan 1 con 2

$Y_{12} = Y_{21}$ $\therefore$ Y_{bus} es una matriz simétrica

Por lo tanto:

15	-10
-10	12.5

Generalizando:

$$[I] = [Y_{bus}][V]$$

o bien

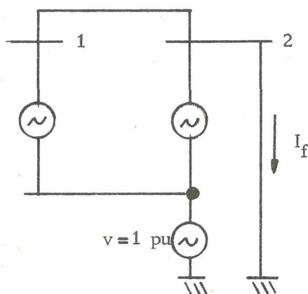
$$[Y_{bus}]^{-1}[I] = [Y_{bus}]^{-1}[Y_{bus}][V]$$

Finalmente:

$$[Y_{bus}]^{-1}[I] = [V] \qquad [Z_{bus}][I] = [V]$$

Artificio

En la red elemental original aplicaremos entre el neutro y tierra una fuente generadora cuyo voltaje es 1 p.u. con la polaridad indicada.



La ecuación matricial:

$$[Z_{bus}][I] = [V]$$

podrá escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Donde I_1 e I_2 son extracciones o inyecciones de corrientes en el nodo que identifica el índice. El nodo 1 no tiene extracciones ni inyecciones, el 2 tiene una extracción que es $-I_f$

Por lo tanto la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -If \end{bmatrix}$$

Respecto a los voltajes, no sabemos cuánto vale V_1, pero conocemos el valor V_2

$$V_2 = -1 \text{ p.u.}$$

Valor justificado por el voltaje de la fuente indicada entre neutro y tierra. Por tanto, la ecuación queda como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -If \end{bmatrix}$$

De donde podemos obtener que:

$$-1 = 0 + Z_{22}(-If) \qquad If = \frac{1}{Z_{22}}$$

Concluyéndose que los elementos diagonales de Z_{bus} son las impedancias de Thevenin.

De la misma última ecuación matricial podemos obtener:

$$V_1 = Z_{11} \times 0 + Z_{12}(-If); \qquad If = \frac{1}{Z_{22}}$$

$$\text{y} \qquad V_1 = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}}$$

Si deseamos calcular contribuciones, por ejemplo en la rama que une 1 con 2 , hacemos lo siguiente:

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{z_{12}} \qquad \frac{-\frac{Z_{12}}{Z_{22}} - (-1)}{z_{12}} \qquad \frac{Z_{22} - Z_{12}}{Z_{22} z_{12}}$$

Este resultado puede conducir a una fórmula general para el cálculo de contribuciones

$$I_{MN} = \frac{-Z_{Mi} + Z_{Ni}}{Z_{ii} \; z_{MN}}$$

Donde: M = nodo de salida
N = nodo de llegada
i = nodo fallado

I-8

Solución final:

De $[Y_{bus}]$ deberá obtenerse $[Z_{bus}]$

$$\begin{bmatrix} 15 & -10 \\ -10 & 12.5 \end{bmatrix}^{-1} = [Z_{bus}] \qquad [Z_{bus}] = \begin{bmatrix} \frac{12.5}{87.5} & \frac{10}{87.5} \\ \frac{10}{87.5} & \frac{15}{87.5} \end{bmatrix}$$

De Z_{bus} podrán obtenerse directamente corrientes de falla en --- cualquier nodo y las contribuciones aplicando la formula:

$$I_{MN} = \frac{-Z_{Mi} + Z_{Ni}}{Z_{ii} \cdot z_{MN}}$$

Asi: en el nodo 2 la falla total vale:

$$I_f = \frac{1}{Z_{22}} = \frac{1}{\frac{15}{87.5}} = 5.833 \text{ pu.}$$

Y las contribuciones:

$$I_{1-2} = \frac{-Z_{12} + Z_{22}}{Z_{22} \quad z_{12}} = \frac{-\frac{10}{87.5} + \frac{15}{87.5}}{\frac{15}{87.5} \times 0.10} = 3.333 \text{ pu.}$$

$$I_{o-2} = \frac{Z_{22}}{Z_{22} \quad z_{02}} = \frac{15/87.5}{(15/87.5)\ o.40} = \frac{1}{0.4} = 2.500 \text{ pu.}$$

Que conciden con los resultados obtenidos anteriormente.

12.-REDES EQUIVALENTES

CONCEPTOS GENERALES

El uso de equivalentes es tan frecuente, que inclusive se llega a pensar que la representación usual de los distintos elementos que conforman una red se basan en un concepto preciso, esto por supuesto es falso. Los equivalentes se emplean para:

Componentes lineales:

1.-Líneas.

Representadas mediante el circuito equivalente que contiene una resistencia serie R, una reactancia serie X y una admitancia en paralelo Y, todos ellos elementos constantes, lineales y bilaterales.

2.-Transformadores.

Representados mediante la reactancia de dispersión, despreciando la rama magnetizante de su circuito equivalente y si el tap está en otra posición que no sea la nominal se emplea un transformador ideal.

Componentes no-lineales:

1.-Generadores.

El elemento más complejo de la red, se suele representar mediante un voltaje constante atrás de una impedancia equivalente, o mediante una fuente de corriente constante. Por ser la fuente generadora de potencia su comportamiento está lejos de ser o corresponder al de una fuente de voltaje o corriente constantes.

2.-Cargas.

Las cargas suelen representarse como impedancias constantes o como corriente constante para la parte real e impedancia constante para la parte reactiva. Debe aceptarse sin embargo que, como tal, está compuesta por una infinidad de elementos diversos -máquinas inclusive- que se apartan del concepto del equivalente usado generalmente.

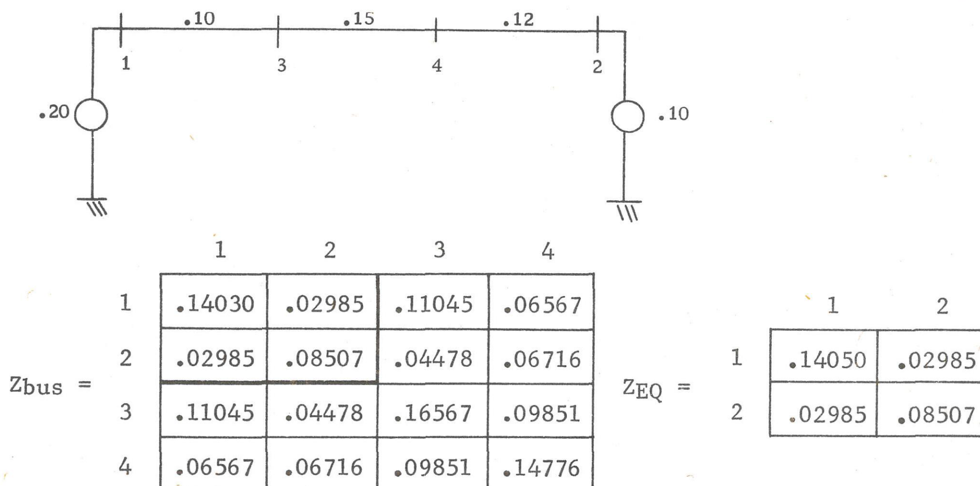
O sea que todos los elementos que usualmente conforman una red, se representan mediante circuitos equivalentes. Puede afirmarse que todos ellos se soportan en la generalización de los teoremas de Thevenin y Norton.

En algunos casos no sólo es conveniente sino necesario, reducir el tamaño de la red. Esto puede ser por limitaciones de cálculo o por no requerirse en ciertas regiones de la misma gran precisión.

El procedimiento que se indica enseguida, es tal vez el más rudimentario para la obtención de redes equivalentes, pero ha podido ser aplicado con buenos resultados en estudios de cortos circuitos, flujos y estabilidad.

Bien sabido es que la matriz Z_{bus} formada para una red o sistema contiene las impedancias de entrada en la diagonal principal y las de transferencia en los elementos no-diagonales. Como una partición de Z_{bus}, se puede obtener Z_{EQ} que contiene impedancias de entrada (driving point) y de transferencia sólo de los buses retenidos. Lo anterior se explica enseguida con un ejemplo:

Para el sistema de cinco nodos de la figura, cuyos parámetros se anotan en el diagrama Z_{bus} y Z_{EQ} para los nodos 1 y 2 valen:



Z_{bus} =

	1	2	3	4
1	.14030	.02985	.11045	.06567
2	.02985	.08507	.04478	.06716
3	.11045	.04478	.16567	.09851
4	.06567	.06716	.09851	.14776

Z_{EQ} =

	1	2
1	.14050	.02985
2	.02985	.08507

* Leer páginas 92-97 de este mismo capitulo.

La inversión de Z_{EQ} contiene las admitancias propias y de transferencia de la red por reducir, pero sólo para los nodos retenidos. Por lo tanto:

Y_{EQ} = Z_{EQ}^{-1} =

7.70262	-2.70274
-2.70274	12.70325

Nota: Otro modo de obtener Y_{EQ}, es mediante una reducción de la matriz Y_{bus} aplicando el algoritmo

$$Y_{ij(nueva)} = Y_{ij(vieja)} - \left[\frac{Y_{iL}\, Y_{Lj}}{Y_{LL}} \right]$$

O sea: Para el sistema propuesto: Y_{bus} vale:

Y_{bus} =

	1	2	3	4
1	15.0	-0	-10.0	-0
2		18.3333	-0	-8.3333
3			16.66667	-6.6667
4				15.0000

Si eliminamos los nodos 3 y 4 obtenemos, en dos pasos:

1er. paso: Eliminación del nodo 4 para: $i = 1$ $j = 1, 2, 3$ $L = 4$

$$Y_{11} = Y_{11} - (Y_{14} \times Y_{41}) / Y_{44} = 15.0$$

$$Y_{12} = Y_{12} - (Y_{14} \times Y_{42}) / Y_{44} = 0$$

$$Y_{13} = Y_{13} - (Y_{14} \times Y_{43}) / Y_{44} = -10$$

para: $i = 2$ $j = 2, 3$ $L = 4$

$$Y_{22} = Y_{22} - (Y_{24} \times Y_{42}) / Y_{44} = 13.70370$$

$$Y_{23} = Y_{23} - (Y_{24} \times Y_{43}) / Y_{44} = -3.70370$$

para: $i = 3$ $j = 3$

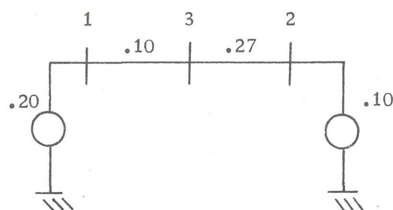
$$Y_{33} = Y_{33} - (Y_{34} \times Y_{43}) / Y_{44} = 13.70370$$

Lo que resumido queda:

$Y_{bus\ 1}$ =

	1	2	3
1	15	0	-10
2		13.70370	-3.70370
3			13.70370

$Y_{bus(1)}$ no es partición de Y_{bus} sino la matriz que corresponde a una red equivalente de la primera -- donde no aparece el nodo 4 y que puede verificarse (para este caso sencillo) por inspección.



Y_{bus} =

	1	2	3
1	15	0	-10
2	0	13.70370	-3.70370
3	-10	-3.70370	13.70370

2o. paso: Eliminación del nodo 3 para: $i = 1$ $\quad j = 1,\ 2$ $\quad L = 3$

$$Y_{11} = Y_{11} - (Y_{13} \times Y_{31})/ Y_{33} = 7.70270$$

$$Y_{12} = Y_{12} - (Y_{13} \times Y_{32})/ Y_{33} = -2.70270$$

para: $i = 2$ $\quad j = 2$

$$Y_{22} = Y_{22} - (Y_{23} \times Y_{32})/ Y_{33} = 12.70270$$

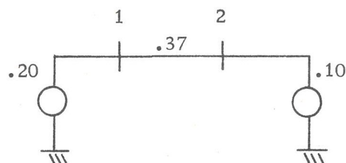
De donde

$Y_{bus(2)}$ =

7.7027	-2.70270
-2.70270	12.70270

$Y_{bus(2)}$ puede verificarse por inspección si se asocia a un sistema donde no aparecen los nodos (3) y (4)

Así:



Y_{bus} =

	1	2
1	7.7027	-2.7027
2	-2.70270	12.7027

Como se observa el procedimiento es consistente.

Conocida Y_{EQ} se podrá obtener Y_{EL} matriz cuadrada de orden igual al número de buses retenidos, en ella, los elementos diagonales representan la admitancia del nodo correspondiente a la referencia y los elementos no-diagonales representan la admitancia entre los nodos correspondientes. Para calcular los elementos de Y_{EL} ("y" minúsculas) se parte del hecho de que se conocen los elementos de Y_{EQ} ("Y" mayúsculas) y se procede como sigue:

$$y_{ii} = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} \qquad\qquad y_{ij} = -Y_{ij}$$

Por lo tanto:

$$y_{11} = \sum_{j=1}^{2} Y_{ij} = 7.7027 - 2.70270 = 5.0$$

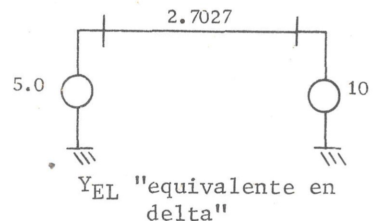
$$y_{ij} = + 2.7027$$

$$y_{22} = \sum_{j=1}^{2} Y_{ij} = -2.7027 + 12.7027 = 10.0$$

Debe resaltarse el hecho de que al formar Y_{bus}, las admitancias propias son la suma de todas las admitancias que inciden en el nodo y las admitancias mutuas la suma de admitancias que conectan los nodos correspondientes. La sumatoria $\sum_{j=1}^{n} Y_{ij}$ resta a la propia todas las mutuas por lo que Y_{ii} da directamente el "shunt" conectado al nodo correspondiente.

Por último:

$$Y_{EL} = \begin{array}{|c|c|} \hline 5.0 & 2.7027 \\ \hline 2.7027 & 10.0 \\ \hline \end{array}$$



Y_{EL} "equivalente en delta"

El circuito o red equivalente que se desea deberá contener impedancias, no admitancias, para poder ser usado en forma inmediata. La matriz que contiene esa información será Z_{EL} y sus elementos se calculan del siguiente modo (a partir de Y_{EQ})

$$z_{ii} = \frac{1}{\sum_{j=}^{n} Y_{ij}} \qquad\qquad z_{ij} = \frac{-1}{Y_{ij}}$$

Efectuando las operaciones sugeridas se obtiene:

$$z_{11} = \frac{1}{7.7027-2.7027} = \frac{1}{5.0} = 0.20$$

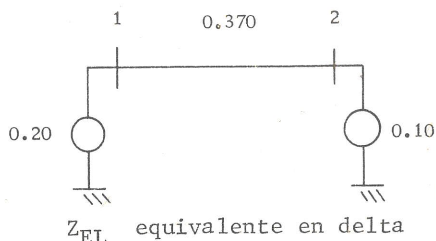
$$z_{12} = \frac{-1}{-2.7027} = 0.370$$

$$z_{22} = \frac{1}{-2.7027 + 12.7027} = \frac{1}{10}$$

y por lo tanto Z_{EL} vale:

Z_{EL} =

	1	2
1	0.20	0.370
2	0.370	0.10

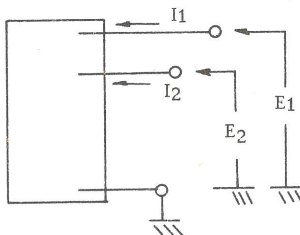


Z_{EL} equivalente en delta

Si algún elemento de Y_{EQ} es cero o muy pequeño, tal hecho significará que no existe conexión entre los buses correspondientes.

Generalización del Procedimiento:

En la red de la figura (red pasiva) se aplican E_1 y E_2 y fluyen I_1 e I_2, como la red es pasiva todos los demás voltajes valen cero.



Podremos escribir las ecuaciones de malla de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

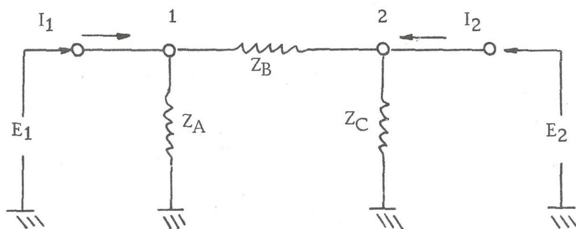
De donde: $I_1 = E_1 \dfrac{\Delta_{11}}{\Delta Z} + E_2 \dfrac{\Delta_{21}}{\Delta Z}$

$$I_2 = E_1 \frac{\Delta_{12}}{\Delta Z} + E_2 \frac{\Delta_{22}}{\Delta Z}$$

Que pueden escribirse en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta_{11}}{\Delta Z} & \frac{\Delta_{21}}{\Delta Z} \\ \frac{\Delta_{12}}{\Delta Z} & \frac{\Delta_{22}}{\Delta Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Esta matriz pudiera ser similar a Y_{bus} correspondiente a la red de la figura siguiente:



$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} & -\frac{1}{Z_B} \\ -\frac{1}{Z_B} & \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\left[Y_{bus}\right] \left[E\right] = \left[I\right]$$

Si: $Y_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta Z}$ (1) $\qquad Y_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta Z}$ (2) $\qquad -Y_{21} = -Y_{12} = \frac{\Delta_{21}}{\Delta Z}$ (3)

El resultado indica que una transformación o reducción a un equivalente en estrella o delta es siempre posible aunque los elementos de la red equivalente <u>no sean realizables físicamente</u>.

Por último, resulta obvio que para reducir una red de gran tamaño, en la cual los parámetros son números complejos, se deberá diseñar un programa para computadora. Nos permitimos sugerir como procedimiento más lógico el siguiente:

1o. Formar Y_{bus}

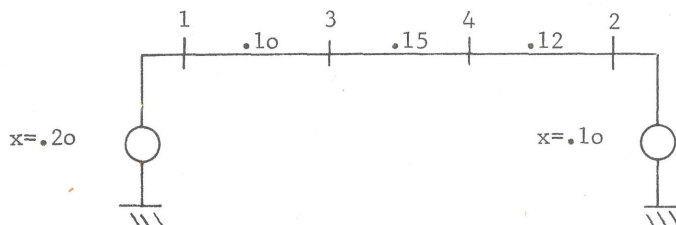
2o. Obtener a partir de Y_{bus}, Y_{EQ}

3o. A partir de Y_{EQ} obtener Z_{EL}

Con esto se evita el tener que invertir una matriz compleja (Z_{EQ}) que si bien es simétrica complica la labor de programación.

Obtención para el sistema propuesto como ejemplo, de Z_{bus} y sus comprobaciones.

El sistema propuesto es el siguiente:



La formación de Z_{bus} se hará usando la tabla de la pág. 75

Elemento	"p" No es Nodo de Referencia		"p" Si es Nodo de Referencia	
RAMA	$Z_{qi} = Z_{pi}$	$i \neq q$	$Z_{qi} = 0$	$i \neq q$
(Agrega nuevo nodo)	$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq}$	$i = q$	$Z_{qq} = z_{pq}$	$i = q$
CUERDA	$Z_{Li} = Z_{pi} - Z_{qi}$	$i \neq L$	$Z_{Li} = -Z_{qi}$	$i \neq L$
(No agrega nuevo nodo)	$Z_{LL} = Z_{pL} - Z_{qL} + z_{pq}$	$i = L$	$Z_{LL} = -Z_{qL} + z_{pq}$	$i = L$

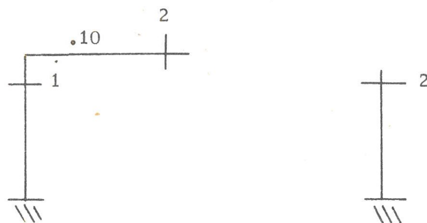
Y se inicia como sigue; primeros elementos que se adicionan:



Z_{bus} vale:

Z_{bus} =		1	2
	1	.20	0
	2	0	.10

Se adiciona enseguida el elemento 1 - 3



Aplicando el algoritmo:

$p = 1$ "p" no es nodo de referencia

$q = 3$

$i = 0, 1, 2, 3$

$$Z_{qi} = Z_{pi} \qquad i \neq q$$

$$Z_{31} = Z_{11} = .20$$

$$Z_{32} = Z_{12} = 0$$

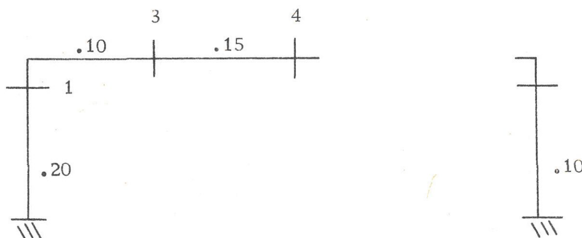
$$Z_{33} = Z_{13} + z_{pq} = .20 + .10 = .30$$

Se obtiene:

Z_{bus} =

	1	2	3
1	.20	0	.20
2	0	.10	0
3	.20	0	.30

Se adiciona ahora el elemento 3 - 4



Se aplica el algoritmo

$p = 3$ "p" no es nodo de referencia

$q = 4$ $Z_{qi} = Z_{pi}$

$i = 1, 2, 3, 4$

$Z_{41} = Z_{31} = .20$

$Z_{42} = Z_{32} = 0$

$Z_{43} = Z_{33} = .30$

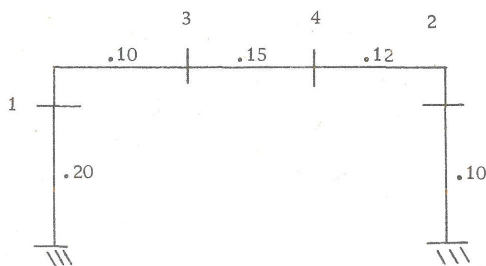
$Z_{44} = Z_{34} + z_{pq} = .30 + .15 = .45$

y Z_{bus} vale:

Z_{bus} =

	1	2	3	4
1	.20	0	.20	.20
2	0	.10	0	0
3	.20	0	.30	.30
4	.20	0	.30	.45

Se completa el sistema mediante la conexión o adición del elemento --- 2 - 4



Se aplica el algoritmo (no agrega nuevo bus o nodo)

$p = 2$ $Z_{Li} = Z_{pi} - Z_{qi}$

$q = 4$ $Z_{L1} = Z_{21} - Z_{41} = 0 - .20 = -.20$

$i = 1, 2, 3, 4,$ $Z_{L2} = Z_{22} - Z_{42} = .10 - 0 = .10$

$Z_{L3} = Z_{23} - Z_{43} = 0 - .30 = -.30$

$Z_{L4} = Z_{24} - Z_{44} = 0 - .45 = -.45$

$$Z_{LL} = Z_{pL} - Z_{qL} + z_{pq}$$

$$= Z_{2L} - Z_{4L} + .12 = .10 + .45 + .12 = 0.670$$

Y se obtiene:

Z_{bus} =

	1	2	3	4	L
1	.20	0	.20	.20	-.20
2	0	.10	0	0	.10
3	.20	0	.30	.30	-.30
4	.20	0	.30	.45	-.45
L	-.20	.10	-.30	-.45	.67

Enseguida y como paso final, se procede a la eliminación del nodo ficticio " L"

El algoritmo es:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{iL} * Z_{Lj}}{Z_{LL}}$$

para: i = 1

j = 1, 2, 3, 4

$$Z'_{11} = Z_{11} - \frac{Z_{1L} * Z_{L1}}{Z_{LL}} = .20 - \frac{(-.20)(-.20)}{.67} = .14030$$

$$Z'_{12} = Z_{12} - \frac{Z_{1L} * Z_{L2}}{Z_{LL}} = 0 - \frac{(-.20)(.10)}{.67} = .02985$$

$$Z'_{13} = Z_{13} - \frac{Z_{1L} * Z_{L3}}{Z_{LL}} = .20 - \frac{(-.20)(-.30)}{.67} = .11045$$

$$Z'_{14} = Z_{14} - \frac{Z_{1L} * Z_{L4}}{Z_{LL}} = .20 - \frac{(-.20)(-.45)}{.67} = .06567$$

para: $i = 2$

$j = 2, 3, 4$

$$Z'_{22} = Z_{22} - \frac{Z_{2L} * Z_{L2}}{Z_{LL}} = .10 - \frac{(.10)(.10)}{.67} = .08507$$

$$Z'_{23} = Z_{23} - \frac{Z_{2L} * Z_{L3}}{Z_{LL}} = 0 - \frac{(.10)(-.30)}{.67} = .04478$$

$$Z'_{24} = Z_{24} - \frac{Z_{2L} * Z_{L4}}{Z_{LL}} = 0 - \frac{(.10)(-.45)}{.67} = .06716$$

para: $i = 3$

$j = 3, 4$

$$Z'_{33} = Z_{33} - \frac{Z_{3L} * Z_{L3}}{Z_{LL}} = .30 - \frac{(-.30)(-.30)}{.67} = .16567$$

$$Z'_{34} = Z_{34} - \frac{Z_{3L} * Z_{L4}}{Z_{LL}} = .30 - \frac{(-.30)(-.45)}{.67} = .09851$$

para: $i = 4$

$j = 4$

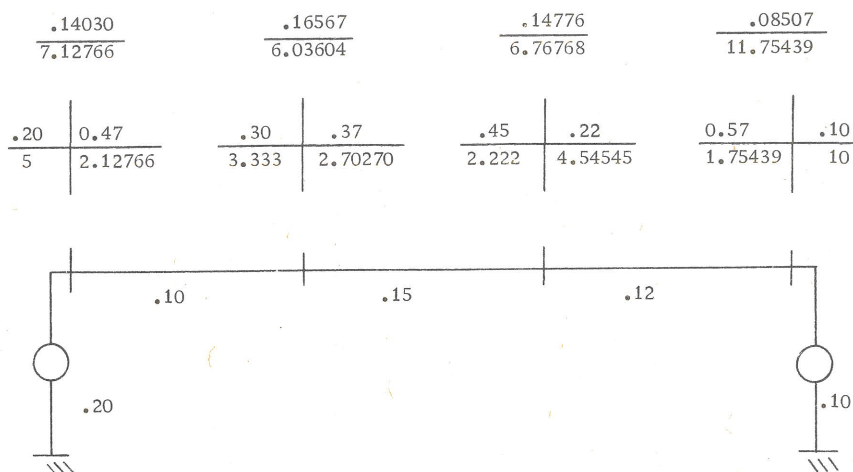
$$Z'_{44} = Z_{44} - \frac{Z_{4L} * Z_{L4}}{Z_{LL}} = .45 - \frac{(-.45)(-.45)}{.67} = .14776$$

Por lo tanto:

Z_{bus} =

	1	2	3	4
1	.14030	.02985	.11045	.06567
2	.02985	.08507	.04478	.06716
3	.11045	.04478	.16567	.09851
4	.06567	.06716	.09851	.14776

Comprobación mediante el cálculo de fallas.



Información que coincide con la que contiene Z_{bus} que merece por lo tanto el visto bueno.

Z_{EQ} es partición de Z_{bus}, implica información de los nodos 1 y 2 solamente. Por lo tanto:

Z_{EQ} =

	1	2
1	.1403	.02985
2	.02985	.08507

De donde podrá obtenerse $Y_{EQ} = Z_{EQ}^{-1}$

Y_{EQ} =

7.70262	-2.70274
-2.70274	12.70325

INDICE

EDICIONES DEL SECTOR ELECTRICO

LIC. HUGO CERVANTES DEL RIO
Director General de Comisión Federal de Electricidad.

ING. MANUEL MORENO TORRES
Subdirector General de Comisión Federal de Electricidad.

ING. ADOLFO MARTINEZ VARA
Oficial Mayor de Comisión Federal de Electricidad.

ING. RICARDO CHARVEL TOBIAS
Subdirector General de Cía. de Luz y Fuerza del Centro, S.A. en liquidación.

LIC. ROBERTO RIOS FERRER
Secretaría Particular
de la Dirección General

Elaboración y responsabilidad de la edición:
LIC. HUMBERTO HIRIART URDANIVIA,
Coordinador del Centro Editorial de C.F.E.

EDICIONES DEL SECTOR ELECTRICO

OBRAS PUBLICADAS

OPERACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA ELÉCTRICA. *Ing. Salvador Cisneros Chávez.* Prólogo: Ing. Alberto Escofet Artigas.

GENESIS DE LOS ARTÍCULOS 27 y 123 DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA 1917. *Pastor Rouaix.* Prólogo: Humberto Hiriart Urdanivia.

DISEÑO SÍSMICO DE PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO. ESTADO DEL ARTE. *Daniel Reséndiz. Emilio Rosenblueth y Enrique Mendoza.* Prólogo: Antonio Capella Vizcaíno

CALCULO DE FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA


FEM

Terminó de imprimirse por *Federación Editorial Mexicana*, Manzanillo 64, México 7, D. F., el 30 de Noviembre de 1978.

La edición, en tiro de 2,000 ejemplares, estuvo al cuidado de Ricardo Romero y Rogelio Villarreal.